

Treball de Fi de Grau

Grau d'enginyeria en Tecnologies Industrials

**Modelització i simulació
d'un parc fotovoltaic de gran escala**

MEMÒRIA

Autor: Eduard Feliu Oliva
Director: Eduardo Prieto Araujo
Convocatòria: Juny 2018



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

En aquest treball es pretén dissenyar un model de simulació d'un parc fotovoltaic de gran escala, considerant els elements més rellevants del parc i la forma de controlar-los.

En primer lloc es farà una breu introducció a l'energia solar, comentant-ne la situació actual i el seu funcionament.

A continuació, s'explicarà el funcionament del convertidor estàtic de potència, del tipus *Voltage Source Converter* o VSC. Es comentarà la metodologia de control d'un VSC i es crearà un model amb el programa PSCAD (programari orientat a la simulació de sistemes d'electrònica de potència). El model es simularà en diferents circumstàncies i s'analitzaran els resultats per verificar el seu correcte funcionament.

Tot seguit es dissenyarà el parc fotovoltaic pròpiament dit, basant-se en un parc ja existent. El disseny haurà d'incloure elements com la xarxa elèctrica del parc, els convertidors estudiats prèviament, els transformadors, i el punt de connexió amb la xarxa elèctrica. Es desenvoluparà un model de simulació amb el mateix programa PSCAD, definint tots els elements i els controls que es considerin necessaris.

Finalment, es simularà el model complet del parc davant diferents circumstàncies per verificar el seu correcte funcionament.

SUMARI

Resum.....	2
1- Glossari.....	6
1.1- Símbols.....	6
1.2- Acrònims	7
2- Prefaci	8
3- Introducció	9
3.1- Objectius i abast del projecte	9
4- Introducció a l'energia solar	10
4.1- Principals elements d'una planta solar fotovoltaica.....	10
4.1.1- Panells fotovoltaics	10
4.1.2- Convertidors.....	10
4.1.3- Transformadors.....	11
4.2- Configuració interna de la planta.....	11
4.2.1- Descripció de les configuracions internes.....	11
4.3- Xarxa interna de la planta fotovoltaica.....	12
4.3.1- Radial.....	12
4.3.2- Anell	12
4.3.3- Estrella.....	12
5- Introducció al VSC	13
5.1- Descripció del sistema.....	13
5.2- Model simplificat	14
5.2.1- Esquema de control del convertidor.....	16
5.2.2- <i>Phase Locked Loop</i> (PLL)	17
5.2.3- Llaç de corrent.....	18
5.2.4- Llaç de tensió	21
5.2.5- Esquema elèctric	23
5.2.5.1- Part de contínua.....	23
5.2.5.2- Part d'alterna	24
5.2.6- Model simplificat amb PSCAD.....	25
5.3- Model complet.....	26
5.3.1- Esquema elèctric	26
5.3.2- Modulació	27

5.3.3- Control de potència reactiva.....	28
5.3.4- Model complet en PSCAD	29
6- Power Plant Control	30
6.1- Potència activa	30
6.2- Potència reactiva.....	31
6.3- Implementació dels controls amb PSCAD	32
6.4- Model parc fotovoltaic.....	33
7- Resultats de les simulacions.....	35
7.1- Simulació model simplificat	35
7.1.1- Tensions	35
7.1.2- Corrents.....	36
7.1.3- Potència	38
7.2- Simulació del model complet.....	39
7.2.1- Phase Locked Loop	39
7.2.2- Tensions	40
7.2.3- Corrents.....	42
7.2.4- Potència	43
7.3- Simulació parc complet.....	44
7.3.1- Canvis de consigna	44
7.3.2- Reducció de la potència per efecte d'un núvol.....	46
7.3.3- Pèrdua sobtada d'un convertidor	48
7.3.4- <i>Curtailment</i>	50
8- Pressupost del projecte.....	51
8.1- Cost material.....	51
8.2- Cost recursos humans	51
8.3- Cost total del projecte.....	52
9- Impacte ambiental	53
9.1- Ús del terreny.....	53
9.2- Emissions de gasos d'efecte hivernacle.....	53
9.3- Contaminació acústica	53
9.4- Impacte visual	53
9.5- Materials	53
Conclusions	54

Agraïments	55
Annex A: Transformades de Park i Clarke.....	56
A.1- Transformada de Clarke.....	56
A.2- Transformada de Park	57
Annex B: Paràmetres del convertidor.....	59
Bibliografia.....	60

1- Glossari

1.1- Símbols

E_{DC}	Tensió del bus de contínua del convertidor
E_{DC}^*	Tensió de referència del bus de contínua del convertidor
i_a, i_b, i_c	Corrents de la part alterna del convertidor
I_{DCI}	Intensitat de la font de contínua del convertidor
i_q, i_d	Corrents expressades en la referència qd0
i_q^*, i_d^*	Corrents de referència, expressades en la referència qd0
K_p	Constant de proporcionalitat d'un controlador
K_i	Constant d'integració d'un controlador
l_l	Inductància de la línia
P	Potència bescanviada pel convertidor
P_{AC}	Potència bescanviada pel convertidor en la part d'alterna
P_{DC}	Potència bescanviada pel convertidor en la part de contínua
P^*	Potència activa de referència
Q	Potència reactiva
Q^*	Potència reactiva de referència
r_l	Resistència de la línia
$v_{l0} - v_{z0}$	Diferència de tensions entre el neutre del convertidor i el de la xarxa
v_{la}, v_{lb}, v_{lc}	Tensions de la part alterna del convertidor.
v_{lq}, v_{ld}	Tensions del convertidor, expressades en la referència qd0
v_{za}, v_{zb}, v_{zc}	Tensions de la xarxa elèctrica
v_{zq}, v_{zd}	Tensions de la xarxa expressades en referència qd0
w_e	Velocitat angular de la xarxa
w_n	Pulsació natural d'un sistema de segon ordre
θ	Angle de la xarxa
$\hat{\theta}$	Angle estimat de la xarxa

ξ	Factor d'amortiment d'un sistema de segon ordre
τ	Constant de temps d'un controlador de primer ordre.

1.2- Acrònims

VSC	Voltage Source Converter
PPC	Power Plant Control
AC	Alternating Current (Corrent Altern)
DC	Direct Current (Corrent Continu)
MPPT	Maximum Power Point Tracking
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
PCC	Point of Common Coupling
PLL	Phase Locked Loop
PI	Proporcional Integral, referit a un controlador
PWM	Pulse Width Modulation
TSO	Transmission System Operator

2- Prefaci

Durant els últims anys s'ha vist com la demanda d'energia elèctrica creixia, però alhora ho feia la consciència de la importància que aquest creixement fos sostenible. S'estima que durant els pròxims 20 anys, la demanda elèctrica creixerà un 41% gràcies a les necessitats domèstiques i de les indústries [1]. Els efectes del canvi climàtic, deguts principalment en la utilització excessiva que s'ha fet de combustibles fòssils, són cada cop més evidents i tenen més impacte social i mediàtic. Davant aquesta situació, cada cop són més els països que opten per les energies renovables com a fonts de generació d'energia elèctrica.

Dins el sector de les renovables, l'energia solar és una de les que ha experimentat un major creixement, representant menys d'un 1% del total de renovables a l'any 2007 i arribant al 17,7% l'any 2017 [2]. El seu ús va des de petites instal·lacions domèstiques, que s'han fet populars per necessitar poca infraestructura i manteniment, fins a grans instal·lacions que poden arribar fins a desenes o centenars de MW de potència.

Gràcies a això, l'energia solar fotovoltaica s'ha convertit en una de les fonts d'energia renovable més important. De fet, al 2017 ja hi havia instal·lats més de 109 GW de potència a Europa, 210,9 GW a Àsia, 3 GW a Àfrica, 44,6 GW a Nord Amèrica, 3,7 GW a Amèrica del Sud i 6,5 GW a Oceania [2]. La Figura 2.1 mostra l'evolució de la potència solar acumulada durant els últims deu anys.

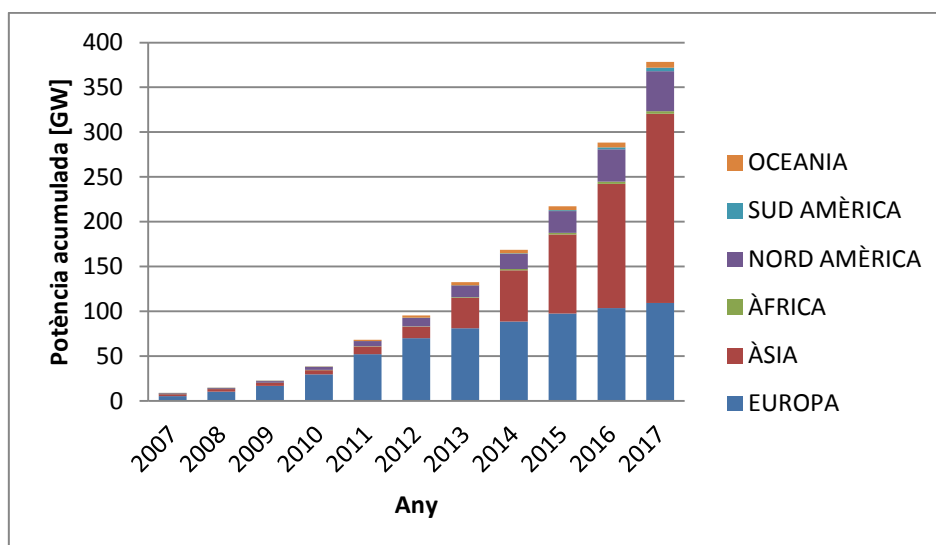


Figura 2.1. Total de potència solar acumulada durant el període 2007-2017 [2]

Amb aquest creixement, el percentatge d'energies renovables té cada cop més pes en el total generat. La influència que poden tenir aquests parcs en la xarxa elèctrica és cada cop més rellevant i això ens obliga a garantir un correcte control, sobretot en casos on la xarxa és més dèbil. Aquí neix la motivació d'aquest treball: estudiar i simular com es fa el control d'una planta d'energia solar fotovoltaica connectada a la xarxa elèctrica.

3- Introducció

En aquest treball es vol estudiar, dissenyar i simular un model del control d'una planta solar fotovoltaica mitjançant el programa PSCAD. Primer es farà una breu introducció als elements principals que formen les plantes fotovoltaïques. Tot seguit, en el capítol 5, s'estudiarà el convertidor de potència del tipus *Voltage Source Converter* (VSC). S'explicarà la metodologia de control, es crearà un model per la simulació i es verificarà el seu correcte funcionament. En el capítol 6 es parlarà del *Power Plant Control* (PPC). Es comentarà els requeriments que ha de complir una planta d'aquestes característiques i com implementar-ho a la pràctica en el control. També es farà un model sencer de la planta, amb tots els elements que s'hauran comentat prèviament i es simularà. Els resultats de les simulacions es mostraran en el capítol 7 del treball. Podrem veure si els resultats són els esperats i per tant si el model que s'ha dissenyat funciona correctament. Per acabar es faran unes conclusions explicant els resultats més rellevants del treball.

3.1- Objectius i abast del projecte

L'objectiu principal del treball és estudiar i dissenyar un model d'un parc fotovoltaic d'uns quants MW de potència, incloent els principals aparells que en formen part i posteriorment simular-lo.

Un objectiu previ i necessari serà crear el model d'un convertidor VSC amb el seu control i assegurar el seu correcte funcionament mitjançant simulacions. Es recrearan situacions que poden tenir lloc en un convertidor real per veure com es comportaria el model.

Un cop completat el model amb els elements bàsics (VSC, transformadors, xarxa...) es pot seguir ampliant amb altres elements com poden ser bancs de condensadors o STATCOMs per la compensació de reactiva.

4- Introducció a l'energia solar

L'objectiu de les plantes solars fotovoltaïques és transformar l'energia de la radiació que rebem del sol en energia elèctrica, apta per la distribució i consum en indústries i habitatges. Però els seus components no només s'han d'encarregar de transformar l'energia solar en elèctrica, també han de connectar la planta a la xarxa i assegurar-ne un correcte funcionament en termes de control i estabilitat. Els elements principals que s'encarreguen d'aquestes funcions són els panells fotovoltaïcs, els inversors i els transformadors. L'objectiu d'aquest apartat serà introduir aquests elements, explicar-ne el funcionament i la forma de connectar-los entre si.

4.1- Principals elements d'una planta solar fotovoltaica

4.1.1- Panells fotovoltaïcs

Els panells fotovoltaïcs són els encarregats de transformar l'energia solar en energia elèctrica. Estan formats per moltes cel·les fotovoltaïques connectades en sèrie que s'ajunten en una estructura que anomenem panell. Hi ha molts materials diferents que poden ser apropiats per construir-los. Tots tenen un impacte important pel que fa a l'eficiència i al preu de les plaques. Els més utilitzats són els cristal·lins o policristal·lins fets a partir de silici, que poden arribar a rendiments entorn un 20% [1]. Altres materials són aptes per fer panells que arriben a un rendiment menor, però s'està fent recerca de nous materials que permetin augmentar el rendiment i reduir els costos.

Els panells cristal·lins i policristal·lins tenen una eficiència elevada i com a conseqüència, necessiten poc terreny per generar una potència fixada. Són fiables i estables al llarg del temps i les matèries primeres necessàries per la seva fabricació són relativament abundants. Es consumeixen pocs recursos per construir-los, fet que afavoreix a reduir el cost de fabricació. Aquests factors són els responsables que aquest tipus de tecnologia hagi dominat els mercats durant els últims anys.

4.1.2- Convertidors

Els convertidors són elements d'electrònica de potència que permeten la conversió de corrent contínua a corrent alterna o al revés. En el cas de l'energia solar, els panells fotovoltaïcs generen corrent contínua que cal transformar per la posterior connexió a la xarxa. El que es fa és connectar diversos panells en sèrie i paral·lel a un convertidor que generi potència AC. El nombre de panells i la forma com els connectem dependran de la tensió o la potència que el convertidor necessiti. A vegades aquesta transformació es fa en dos etapes. Primerament es connecten a un convertidor DC-DC i després a un convertidor DC-AC.

En qualsevol cas, els convertidors fets servir han de corregir els inconvenients derivats de l'ús de panells fotovoltaïcs. Com que el comportament de les plaques no és lineal, caldrà fer un seguiment constant de variables com la radiació i la temperatura per tal d'ajustar la tensió i corrent generats al punt on la potència sigui màxima. Aquesta pràctica es coneix com a *Maximum Power Point Tracking (MPPT)*.

A més a més, caldrà assegurar que es compleix la legislació corresponent a cada país, que pot exigir que la planta aporti estabilitat a la xarxa elèctrica pel que fa a tensió o freqüència.

4.1.3- Transformadors

En les plantes de gran escala hi ha dos tipus principals de transformadors. El primer serveix per elevar la tensió des del punt de treball de l'inversor fins a mitja tensió, entre 13,8 i 46 kV [1]. El segon tipus de transformador té dos funcions principals. Una és lògicament elevar la tensió fins a igualar la tensió de la xarxa, i l'altra és proporcionar aïllament galvànic entre la planta i la xarxa elèctrica [1].

Els transformadors poden ser de dos tipus diferents en funció de la potència de l'inversor que es fa servir. Podem tenir transformadors de tres debanats si la potència nominal de l'inversor és major a 500 kW. En aquest cas, el transformador té dos debanats pel costat de baixa tensió i un pel costat d'alta tensió. En el cas en que l'inversor tingui una potència nominal inferior a 500 kW, es fa servir un transformador amb només dos debanats, un pel costat d'alta tensió i un pel costat de baixa tensió [1].

Els transformadors s'han d'escollir en funció de paràmetres com la potència nominal, l'eficiència o el cost. Per exemple, si s'escollís un transformador amb una potència nominal massa baixa, ens crearia un coll d'ampolla, afectant el rendiment total de la planta. D'altra banda, si el convertidor fos massa gran ens podria generar problemes d'inestabilitat.

4.2- Configuració interna de la planta

La connexió dels inversors amb els panells es pot fer de tres maneres diferents: central, en sèrie i multisèrie. És molt important escollir correctament la configuració adequada en funció de la potència nominal, la localització, el cost, l'eficiència... ja que això afecta directament la potència total produïda. En aquest apartat es farà un resum d'aquestes configuracions i les seves principals característiques, els seus avantatges i els inconvenients.

4.2.1- Descripció de les configuracions internes

Les tres configuracions que s'han comentat abans estan il·lustrades en la figura 2. La configuració "central" connecta milers de panells en un únic convertidor. Els panells es connecten en sèrie i en paral·lel en funció de la tensió i potència desitjades. La segona topologia, en sèrie, connecta els panells en sèrie al convertidor, i en la configuració en multisèrie es connecten a un convertidor dc-dc i posteriorment es connecten 4 o 5 convertidors dc-dc a un inversor. Cada configuració presenta unes característiques diferents pel que fa a pèrdues, cost o rendiment.

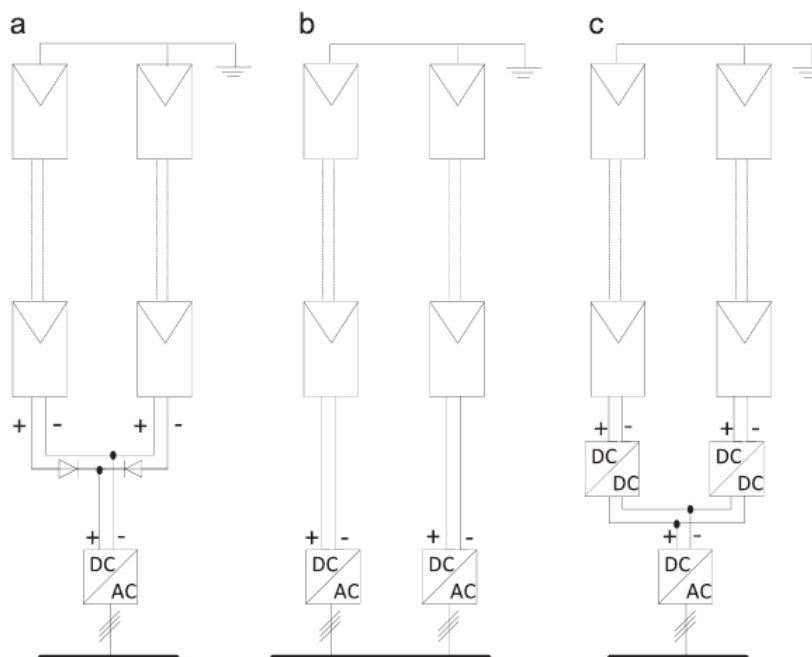


Figura 2. A) Configuració central. B) Configuració en sèrie. C) Configuració en multisèrie [1]

4.3- Xarxa interna de la planta fotovoltaica

En aquest apartat es pretén explicar les diferents formes com podem connectar els transformadors, considerant les principals avantatges i inconvenients. Es consideraran tres configuracions principals per connectar-los: radial, anell i estrella.

4.3.1- Radial

En la configuració radial es connecten molts convertidors en sèrie, com es mostra en la figura 3. La majoria de les plantes solars de gran escala fa servir aquesta configuració perquè és la més simple i menys costosa, però també és la menys fiable, ja que si el primer dels inversors deixa de funcionar, es perd tota la cadena d'aparells connectats darrere seu.

4.3.2- Anell

La configuració en anell millora la fiabilitat de la radial. Està basada en el mateix concepte, però en aquest cas es connecta la cadena pels dos extrems. D'aquesta manera, si es perd un dels convertidors, tots els que estiguin connectats a l'altre costat seguiran generant potència. Com a contrapartida tenim que el cost i la complexitat de la instal·lació augmenta.

4.3.3- Estrella

Aquest tipus de configuració consisteix en connectar un convertidor directament al col·lector principal. Normalment aquest es troba al mig de la planta per tal de reduir la distància dels cables i per tenir les mateixes pèrdues en cada convertidor. Aquesta és la configuració més fiable ja que si algun convertidor deixés de funcionar, els altres continuarien subministrant potència com si no hagués passat res. Tot i això és més car dels tres casos.

5- Introducció al VSC

Els convertidors del tipus *Voltage Source Converter* són els elements principals de les microxarxes i sistemes de generació. Davant la necessitat d'integrar energies renovables a la xarxa, els convertidors han de ser capaços de controlar i gestionar la variabilitat natural d'aquestes fonts d'energia, per assegurar per exemple, un correcte flux de potència o una tensió adequada, sense afectar l'estabilitat de la xarxa. En el cas estudiat, els aparells fotovoltaics necessiten la conversió AC-DC per injectar la potència generada a la xarxa.

Hi ha una àmplia varietat d'estructures diferents per als convertidors que s'utilitzen per connectar les fonts renovables a la xarxa. El que es farà servir en aquest model es basa en sis transistors bipolars de porta aïllada (Insulated Gate Bipolar Transistor) o IGBT. Aquests dispositius permeten modular qualsevol voltatge desitjat gràcies a la seva velocitat de commutació.

5.1- Descripció del sistema

El sistema a modelar es representa a la Figura 5.1. Per una banda tenim la xarxa elèctrica (trifàsica) i a l'altra banda una font de generació de contínua. El VSC permet l'intercanvi de potència entre els dos costats. Com es pot veure, està compost de tres branques amb dos IGBT cadascuna (un total de sis IGBT). El punt mig es connecta a la xarxa mitjançant unes inductàncies a les quals associarem també una resistència. Les inductàncies permetran que la connexió a la xarxa sigui més suau. Modelant adequadament la commutació dels IGBT permetrà generar la tensió trifàsica desitjada per controlar la potència activa i reactiva.

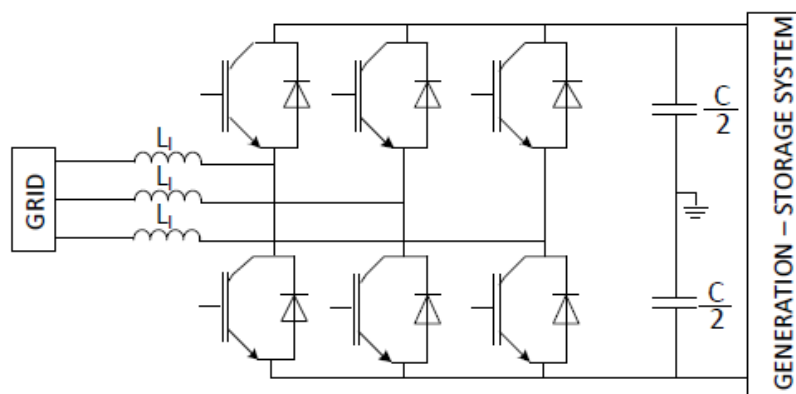


Figura 5.1. esquema d'un VSC amb la xarxa trifàsica i el sistema de generació en contínua [3]

Al costat DC del convertidor s'hi connectarien un cert nombre de panells fotovoltaics en sèrie i en paral·lel. Pel model, es simplificarà a una font de corrent contínua, que representarà la potència injectada pels panells. Per representar la xarxa es faran servir tres fonts de tensió alterna. En la Figura 5.2 es pot veure un esquema de la connexió del convertidor a la xarxa i a la font de corrent.

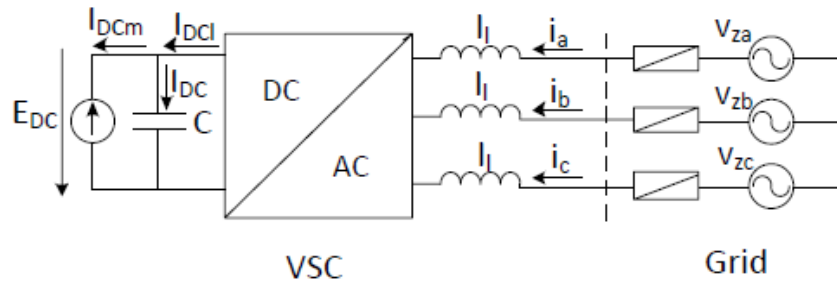


Figura 5.2. Convertidor VSC amb la part de contínua representada com una font de corrent i un condensador [3]

5.2- Model simplificat

Crear el model d'un convertidor que simuli correctament les commutacions dels IGBT és bastant complex. Per aquest motiu, i amb l'objectiu d'entendre millor el seu funcionament, primer es va fer un model simplificat de menor potència, amb la finalitat d'entendre el seu comportament. Consistia en separar la part de contínua i la d'alterna tal com es mostra a la Figura 5.3. Com es pot veure, la part DC es modela com una font de corrent i la part AC es modela com tres fonts de tensió.

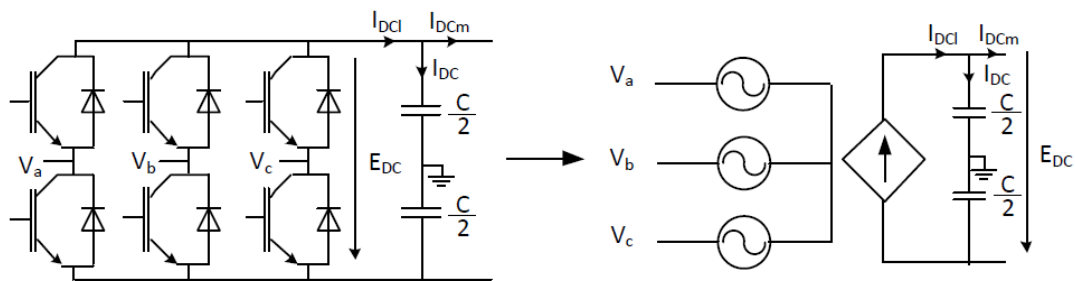


Figura 5.3. Model simplificat del convertidor VSC [3]

En aquest model, la font de corrent del costat DC representa la potència intercanviada entre les dues parts, i cal assegurar que es mantingui el balanç d'energia. La intensitat es pot calcular mitjançant:

$$I_{DCl} = \frac{P_{ac}}{E_{DC}}$$

On I_{DCl} és la intensitat de la font de corrent, P_{ac} és la potència del costat d'alterna i E_{DC} és la tensió del costat de contínua. D'aquesta manera ens assegurem que la potència intercanviada és la mateixa pels dos costats.

En la Figura 5.4 podem veure com queda el model simplificat de la part d'alterna del convertidor.

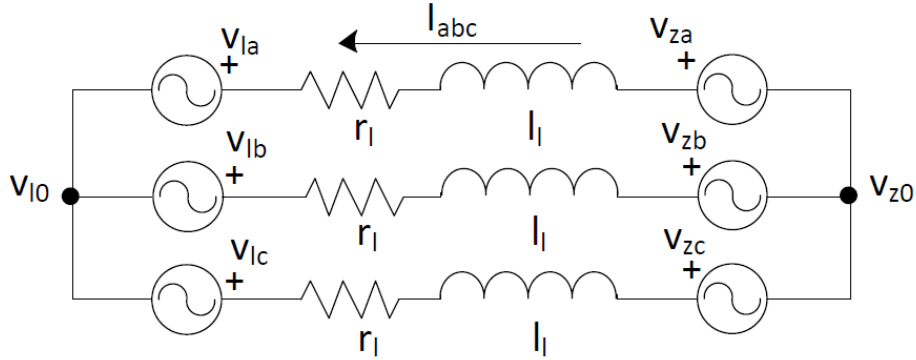


Figura 5.4. Model simplificat de la part AC d'un convertidor VSC [3]

D'aquest esquema en podem treure les equacions per tal de trobar la tensió en alterna. Queda el següent sistema:

$$\begin{bmatrix} v_{za} \\ v_{zb} \\ v_{zc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{la} \\ v_{lb} \\ v_{lc} \end{bmatrix} - (v_{l0} - v_{z0}) \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_l & 0 & 0 \\ 0 & r_l & 0 \\ 0 & 0 & r_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_l & 0 & 0 \\ 0 & l_l & 0 \\ 0 & 0 & l_l \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

On:

v_{za}, v_{zb}, v_{zc} són les tensions de la xarxa

v_{la}, v_{lb}, v_{lc} són les tensions de la part alterna del convertidor.

i_a, i_b, i_c són les corrents de la part alterna del convertidor

r_l, l_l són respectivament, la resistència i la inductància

$v_{l0} - v_{z0}$ és la diferència de tensions entre el neutre del convertidor i el de la xarxa (per al nostre cas d'un sistema trifàsic equilibrat, equival a 0)

Si s'aplica la transformada de Park a les equacions, obtenim les següents expressions:

$$\begin{bmatrix} v_{zq} \\ v_{zd} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{lq} \\ v_{ld} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_l & -l_l \omega_e \\ l_l \omega_e & r_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_l & 0 \\ 0 & l_l \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix}$$

On:

v_{zq}, v_{zd} són les tensions de la xarxa expressades en referència qd0

v_{lq}, v_{ld} són les tensions del convertidor, expressades en la referència qd0

i_q, i_d són les corrents expressades en la referència qd0

ω_e és la velocitat angular de la xarxa

5.2.1- Esquema de control del convertidor

El VSC ens permetrà controlar dues variables elèctriques en la referència $qd0$, que equival a dir que podrem controlar la potència activa i la reactiva per separat. La potència activa prové directament de les plaques i en un primer moment es representarà com una corrent constant. Més endavant, quan es tingui un model més complet, es podrà estudiar que passaria si, per exemple, un núvol tapés part de les plaques i aquesta corrent disminuís. La potència reactiva es pot definir de diferents maneres, com per exemple pot venir fixada per l'operador de la xarxa. Més endavant, quan es parli dels requisits que l'operador pot imposar que hagi de complir el parc fotovoltaic, es comentarà amb més detall quines especificacions ens pot donar.

Per les energies renovables s'acostuma a utilitzar un esquema que reguli la tensió del bus DC i mantingui el balanç de potència, és a dir, que la potència injectada a la xarxa ha de ser la mateixa que la potència generada. Es basa en dos nivells de control. El primer nivell (llaç de corrent) s'encarrega de regular la corrent AC en referència $qd0$ (i_{zd}) mentre que el segon nivell (llaç de tensió) s'encarrega de controlar la tensió del bus DC. En la Figura 5.5 es mostra l'esquema de control comentat.

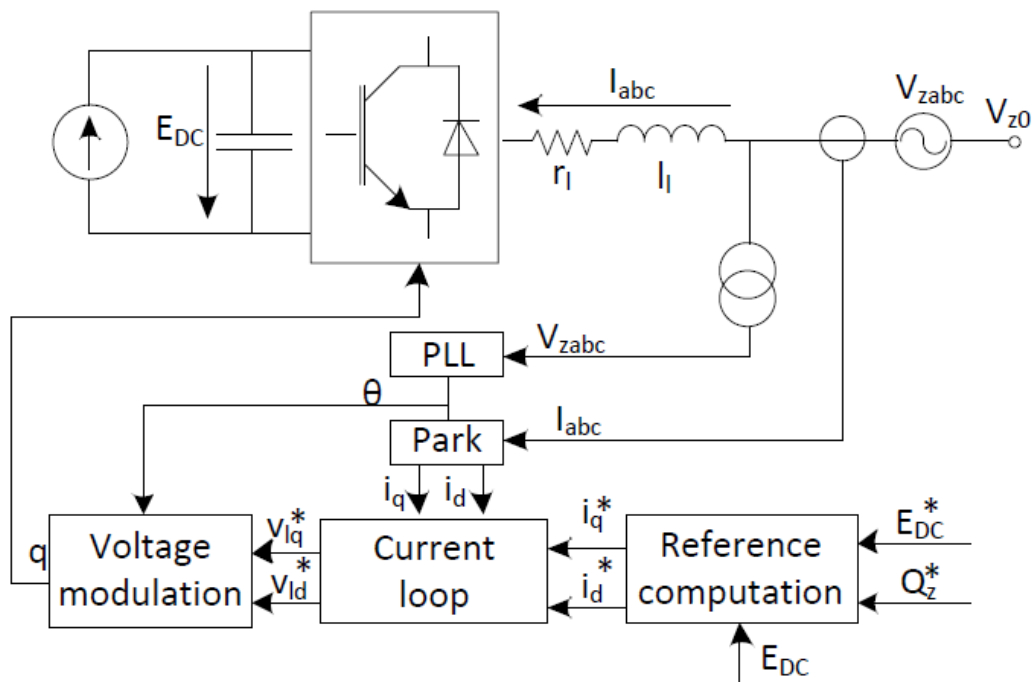


Figura 5.5. Esquema de control d'un convertidor VSC [3]

Com ja s'ha comentat, aquest sistema s'assegura que la tensió del bus de contínua E_{DC} es manté al valor de referència E_{DC}^* , així com d'injectar la potència reactiva demandada Q_z^* . A continuació s'explicaran amb detall els diferents blocs que formen el convertidor.

5.2.2- Phase Locked Loop (PLL)

La funció principal de la PLL o *Phase Locked Loop* és determinar l'angle i la velocitat angular de la xarxa elèctrica i fer-ne un seguiment. Consta d'una realimentació de la component V_{zq} i un controlador PI. La sortida del controlador és la velocitat angular de la xarxa elèctrica (w_e) i integrant la senyal obtenim l'angle de la xarxa. La Figura 5.6 mostra un diagrama de blocs de la PLL.

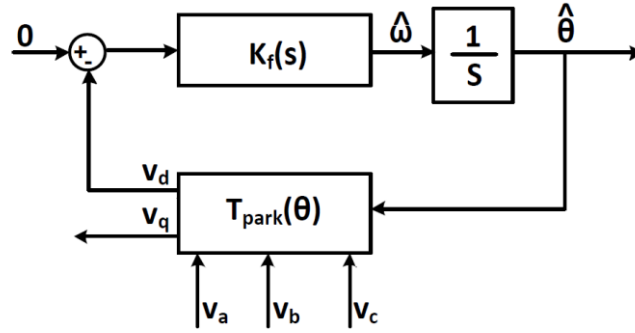


Figura 5.6. Esquema de la PLL d'un convertidor VSC [3]

El sistema es pot linealitzar si s'assumeix que l'error de l'angle és petit. Aleshores queda un sistema de segon ordre definit per:

$$\frac{\hat{\theta}(s)}{\theta(s)} = \frac{2\xi\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$$

On $\hat{\theta}(s)$ és l'angle estimat de la xarxa i $\theta(s)$ és l'angle real.

El controlador $K_f(s)$ és un PI de la forma

$$K_F(s) = K_p \left(\frac{1}{\frac{\tau_{PLL}}{s} + s} \right)$$

On K_p és el valor de la constant proporcional i τ_{PLL} és el valor de la constant de temps del controlador (o equivalentment, $\frac{K_p}{K_i}$).

Els paràmetres K_p i τ_{PLL} es poden calcular fent servir les següents expressions:

$$w_n = \sqrt{\frac{K_p E_m}{\tau_{PLL}}}$$

$$\xi = \frac{\sqrt{\tau_{PLL} K_p E_m}}{2}$$

On E_m és el sobrepuig màxim desitjat, ξ és el factor d'esmoreïment i w_n és la velocitat angular de la xarxa.

En la Figura 5.7 podem veure la implementació en PSCAD de la PLL. A més dels elements que ja s'han comentat, s'hi ha introduït un *feed forward* amb l'objectiu de reduir l'error inicial vist pel sistema. És a dir, com que la freqüència de la xarxa és coneguda (50Hz o 100π rad/s) es suma aquest valor just després del PI. D'aquesta manera el sistema no ha de passar de 0 a la referència en l'estat transitori, sinó que només ha de corregir petites variacions. Això fa que la PLL sigui més estable.

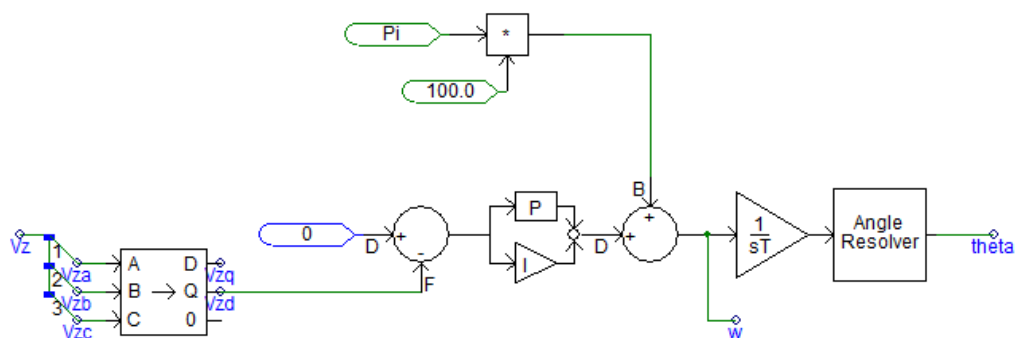


Figura 5.7. Implementació en PSCAD de la PLL

La Figura 5.8 mostra la resposta en el temps (s) de la PLL. Com podem veure, a l'inici no hi ha el comportament transitori típic d'un sistema d'aquest tipus perquè ja s'inicia a la freqüència teòrica i només s'han de corregir petits errors (si es fa molt zoom al gràfic, es podrien apreciar les petites oscil·lacions entorn aquest valor).

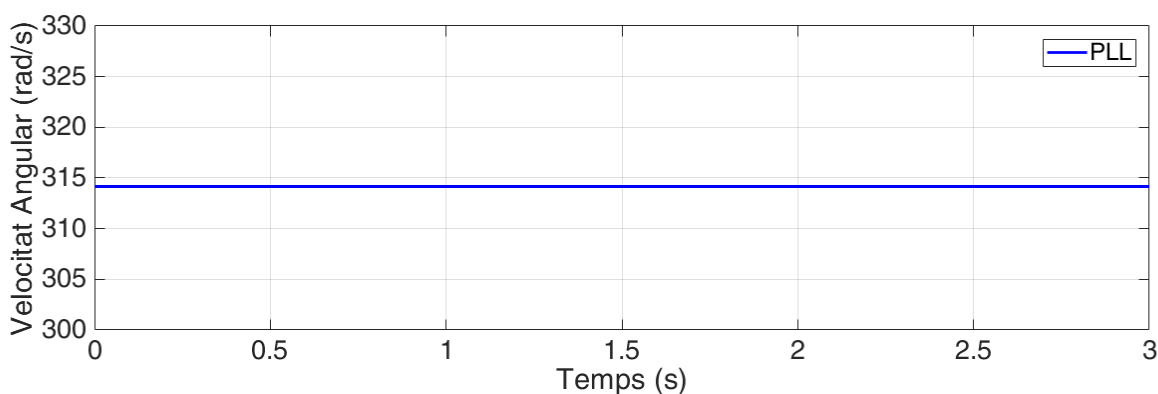


Figura 5.8. Resposta de la PLL

5.2.3- Llaç de corrent

La PLL descrita en l'apartat anterior ens assegura que la component v_{zd} del voltatge és igual a 0. D'aquesta manera, les equacions del voltatge que havíem introduït anteriorment, en el sistema de referència qd0 queden:

$$\begin{bmatrix} v_{zq} \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{lq} \\ v_{ld} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_l & -l_l \omega_e \\ l_l \omega_e & r_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_l & 0 \\ 0 & l_l \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix}$$

Es pot veure que les components d i q dels voltatges depenen alhora tant de i_q com de i_d . Per resoldre aquesta situació, hi ha dos mètodes diferents: el primer consisteix en controlar les components q i d amb un únic controlador de segon grau. El segon mètode consisteix en separar les components d i q per poder controlar-les independentment. En aquest treball s'ha adoptat el segon mètode per fer el control. S'utilitza la següent transformació per separar les components:

$$\begin{bmatrix} v_{lq} \\ v_{ld} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\hat{v}_{lq} + v_{zq} - l_l \omega_e i_{ld} \\ -\hat{v}_{ld} + l_l \omega_e i_{lq} \end{bmatrix}$$

On \hat{v}_{lq} i \hat{v}_{ld} representen la sortida dels controladors i v_{lq} , v_{ld} són les tensions de referència que volem aplicar amb el convertidor. Si substituïm a les equacions d'abans ens queda:

$$\begin{bmatrix} \hat{v}_{lq} \\ \hat{v}_{ld} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_l & 0 \\ 0 & r_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_l & 0 \\ 0 & l_l \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix}$$

Aplicant la transformació de Laplace a les equacions, obtenim les funcions de transferència entre les tensions i les corrents del convertidor.

$$\frac{i_q(s)}{\hat{v}_{lq}(s)} = \frac{1}{l_l s + r_l}$$

$$\frac{i_d(s)}{\hat{v}_{ld}(s)} = \frac{1}{l_l s + r_l}$$

El control es fa mitjançant un PI, amb funció de transferència

$$G_{ciq}(s) = G_{cid}(s) = \frac{K_p s + K_i}{s}$$

On les constants del controlador es poden calcular a partir de les fórmules:

$$K_p = \frac{l_l}{\tau}$$

$$K_i = \frac{r_l}{\tau}$$

On τ és la constant de temps en llaç tancat del llaç de corrent. Aquesta constant de temps s'ha d'escollir en funció de les restriccions físiques del convertidor. Ha de ser més ràpida que la velocitat de commutació del propi convertidor, per exemple, unes deu vegades.

En la Figura 5.9 es representa un esquema de blocs del llaç de corrent, i en la Figura 5.10 es mostra la implementació en PSCAD utilitzada pel model.

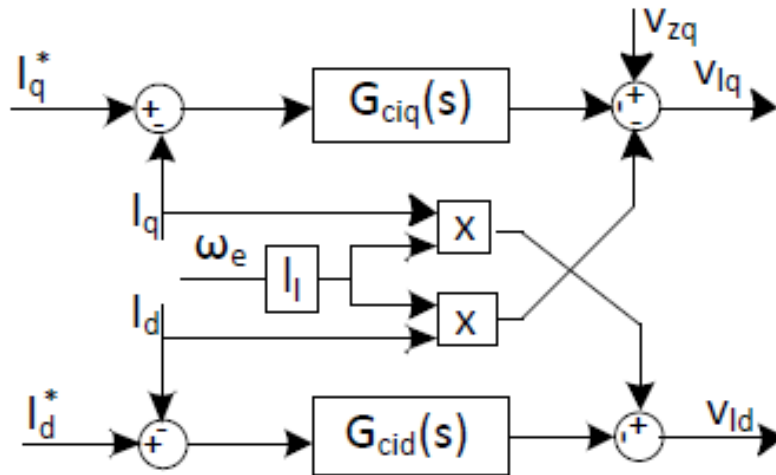


Figura 5.9. Esquema del llaç de corrent [3]

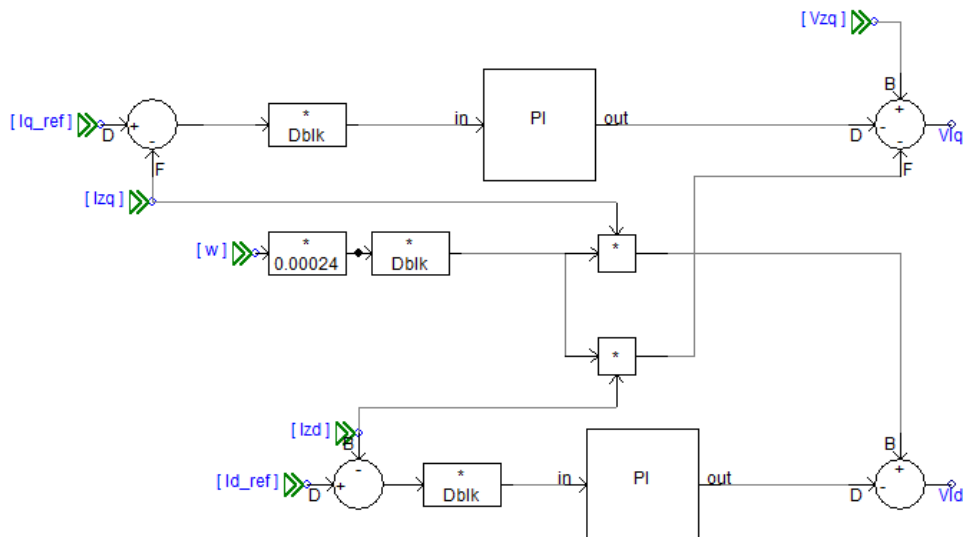


Figura 5.10. Implementació en PSCAD del llaç de corrent

Com es pot observar, la implementació en PSCAD segueix l'esquema de la Figura 5.9, amb la única diferència que s'han incorporat uns guanyos (Dblk). Aquest senyal val 0 inicialment i 1 a partir d'un cert instant de temps. S'ha incorporat per no arrencar tot el sistema de control de cop i poder fer-ho progressivament. D'aquesta forma, s'eviten transitoris que farien inestable el sistema. En la Figura 5.11 es mostra un exemple de la resposta davant graons de corrent.

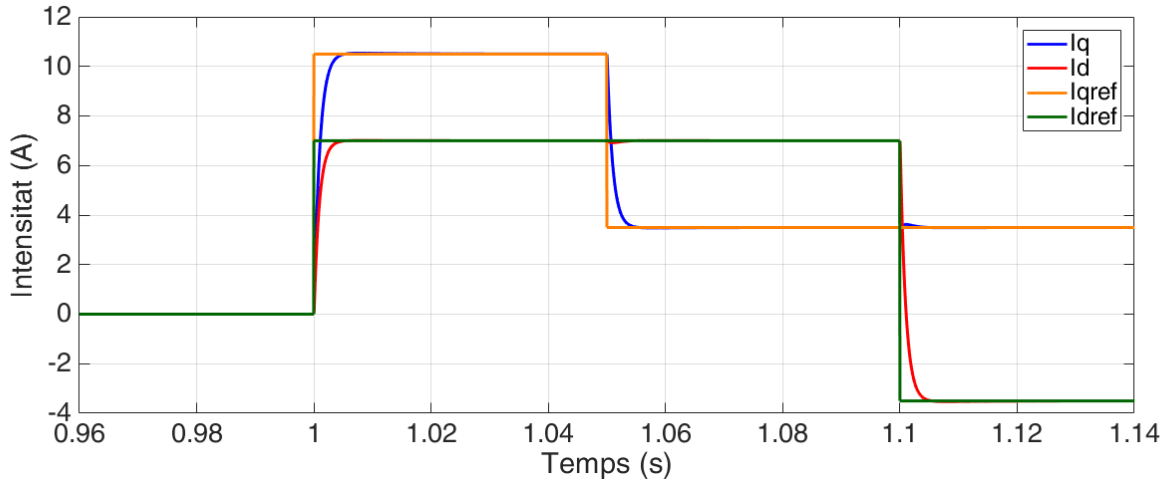


Figura 5.11. Resposta del laç de corrent davant consignes graó

Podem veure que la resposta és estable i segueix el perfil típic d'un sistema de primer ordre.

5.2.4- Llaç de tensió

El laç de tensió és l'encarregat de mantenir la tensió del bus DC al valor de referència per assegurar que la potència generada sigui injectada a la xarxa. Això es fa fixant el valor de referència i_q^* . Les referències de corrent i_q^* i i_d^* s'obtenen a partir de les potències activa i reactiva desitjades, fent servir les següents fórmules:

$$P^* = \frac{3}{2} (v_{zq} i_q^* + v_{zd} i_d^*)$$

$$Q^* = \frac{3}{2} (v_{zq} i_d^* - v_{zd} i_q^*)$$

i suposant que $v_{zd} = 0$ i aïllant les corrents queda:

$$i_q^* = \frac{2 P^*}{3 v_{zq}}$$

$$i_d^* = \frac{2 Q^*}{3 v_{zq}}$$

Cal tenir present que en un sistema real, aquestes corrents haurien d'estar limitades segons les característiques físiques del convertidor. Aquestes limitacions es poden classificar en tres grups, en funció de si prioritzen la potència activa o la reactiva.

- Prioritzant i_q (potència activa) i proporcionant potència reactiva només si és possible.
- Prioritzant i_d (potència reactiva) i proporcionant potència activa només si és possible.
- Mantenir un factor de potència constant, i reduint proporcionalment les potències activa i reactiva.

En aquest cas, la i_q la calcularem a partir de la potència que suposarem generada per les plaques solars, mentre que la i_d la calcularem a partir d'una potència reactiva de referència, que com s'explicarà més endavant, pot venir imposada per l'operador de la xarxa.

Un possible esquema del llaç de tensió el podem veure a la Figura 5.12. Com podem veure, les entrades són la tensió del bus DC i la referència. L'error es fa servir com a entrada d'un PI i a la sortida tenim la potència injectada al condensador P_C^* . Així doncs, la potència de referència pel convertidor serà $P^* = P_C^* + P_{DC}$ on P_{DC} és la potència mesurada abans del condensador. Multiplicant per $\frac{2}{3V_{zq}}$ obtenim la intensitat de referència i_q^* .

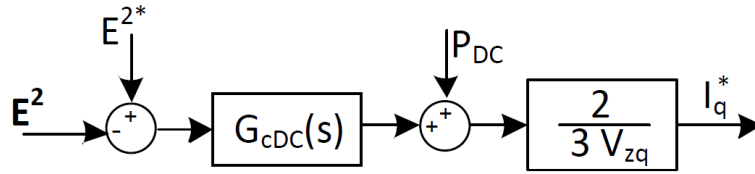


Figura 5.12. Esquema del llaç de tensió d'un convertidor VSC [3]

Per al controlador G_{cDC} es fa servir un PI de la forma:

$$G_{cDC}(s) = \frac{K_{pDC}s + K_{iDC}}{s}$$

I la funció de transferència en llaç tancat queda:

$$\frac{W(s)}{W^*(s)} = \frac{sK_{pDC} + K_{iDC}}{\frac{1}{s}s^2C + sK_{pDC} + K_{iDC}}$$

Si comparem aquesta expressió amb l'expressió típica d'un sistema de segon ordre:

$$\frac{W(s)}{W^*(s)} = \frac{2s\xi_E\omega_E + \omega_E^2}{s^2 + 2s\xi_E\omega_E + \omega_E^2}$$

Deduïm que els valors de les constants del controlador es poden substituir per les següents expressions:

$$K_{pDC} = C\xi_E\omega_E$$

$$K_{iDC} = \frac{C\omega_E^2}{2}$$

On ξ_E és el factor d'esmoreïment desitjat i ω_E és la velocitat angular desitjada. Cal assegurar-se que el llaç de tensió sigui molt més lent que el llaç de corrent per assegurar que el sistema sigui estable. La Figura 5.13 mostra el llaç de tensió que s'ha fet servir amb PSCAD pel model del convertidor.

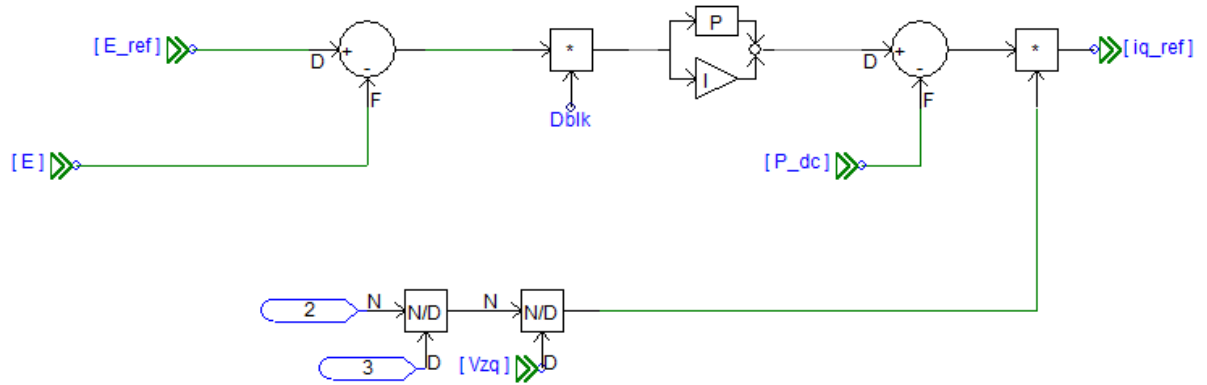


Figura 5.13. Implementació amb PSCAD del llaç de tensió

La Figura 5.14 mostra la resposta del llaç de tensió quan hi ha un canvi de consigna de potència. Es pot veure que passat un transitori, el llaç de tensió corregeix la pertorbació i torna a estabilitzar la tensió al valor de referència. D'aquesta manera, s'assegura que es compleix el balanç de potència entre la part de contínua i la d'alterna.

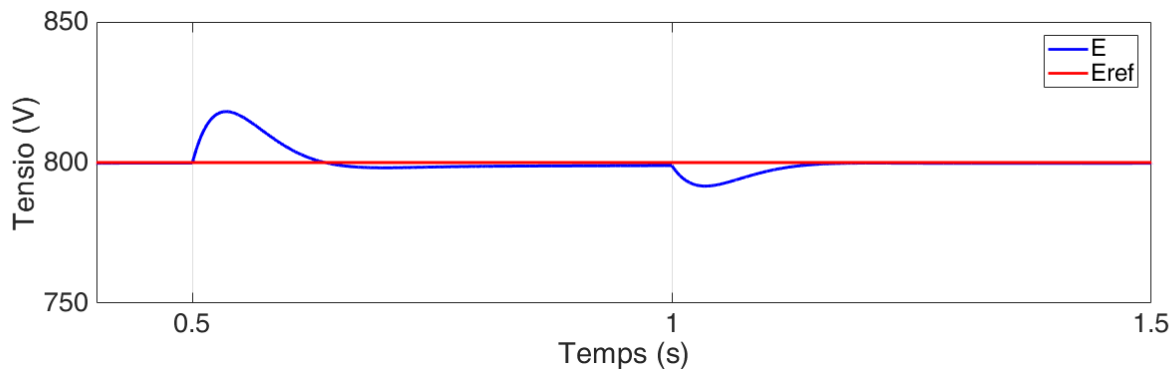


Figura 5.14. En vermell, tensió de referència del bus de contínua. En blau, resposta de la tensió real davant una pertorbació

El valor màxim de tensió el tenim en un pic de 820 V que representa un error del 2,5% més que el valor nominal.

5.2.5- Esquema elèctric

5.2.5.1- Part de contínua

En la Figura 5.15 podem veure l'esquema de la part de contínua dibuixat amb PSCAD. Com ja s'ha explicat anteriorment, aquest és un model simplificat d'un convertidor i la part de contínua i la d'alterna estan separades. Les plaques fotovoltaïques, connectades en sèries i en paral·lel, es representen per una font de corrent controlada, on I_{gen} representa la corrent generada. L'altra font de corrent representa la part de contínua del convertidor.

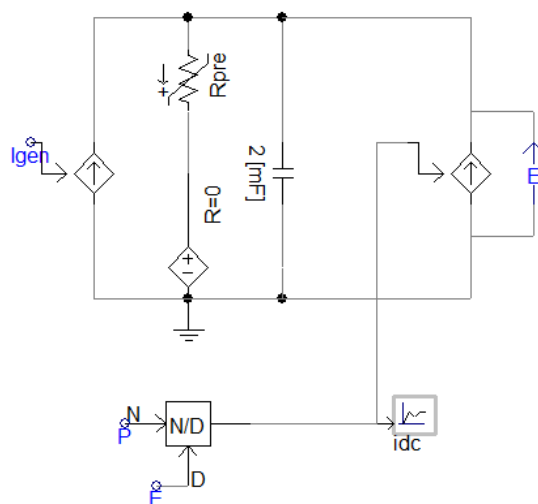


Figura 5.15. Esquema elèctric de la part de contínua amb PSCAD

Cal comentar que s'ha afegit al model una font de tensió en sèrie amb una resistència variable. La única funció d'aquesta font és carregar el condensador fins a un cert nivell que ens permeti realitzar el control de tensió (ja que el programa PSCAD no permet assignar una càrrega inicial al condensador).

Si s'intentés arrencar el control amb el condensador descarregat, el sistema es tornaria inestable. El conjunt de blocs que ens permet fer això està representat a la Figura 5.16. Consta d'un comparador que quan s'accedeix un cert valor de temps, canvia la resistència des d'un valor molt petit a un valor molt gran.

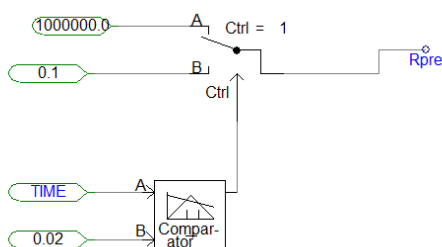


Figura 5.16. resistència variable per carregar el condensador

5.2.5.2- Part d'alterna

La part d'alterna s'ha modelat tal com s'havia ensenyat en esquemes anteriors, tal com podem veure en la Figura 5.17. Per una banda tenim la xarxa elèctrica, representada per una font de tensió trifàsica (dreta) i per l'altra banda tenim tres fonts de tensió controlada, una per cada línia (esquerra). Aquestes són les tensions del convertidor (controlades) i es connecten a la xarxa mitjançant una resistència i una inductància.

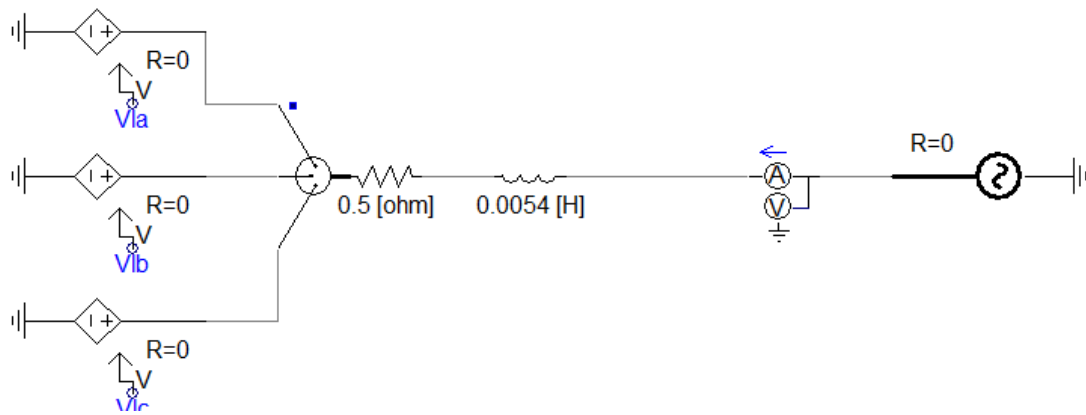


Figura 5.17. Esquema elèctric de la part d'alterna amb PSCAD

5.2.6- Model simplificat amb PSCAD

Tots els controls que s'han explicat anteriorment s'han modelat amb PSCAD com a blocs, amb els seus *inputs* i els seus *outputs*. A partir d'aquí s'han ajuntat tots en un model complet com el que es veu en la Figura 5.18.

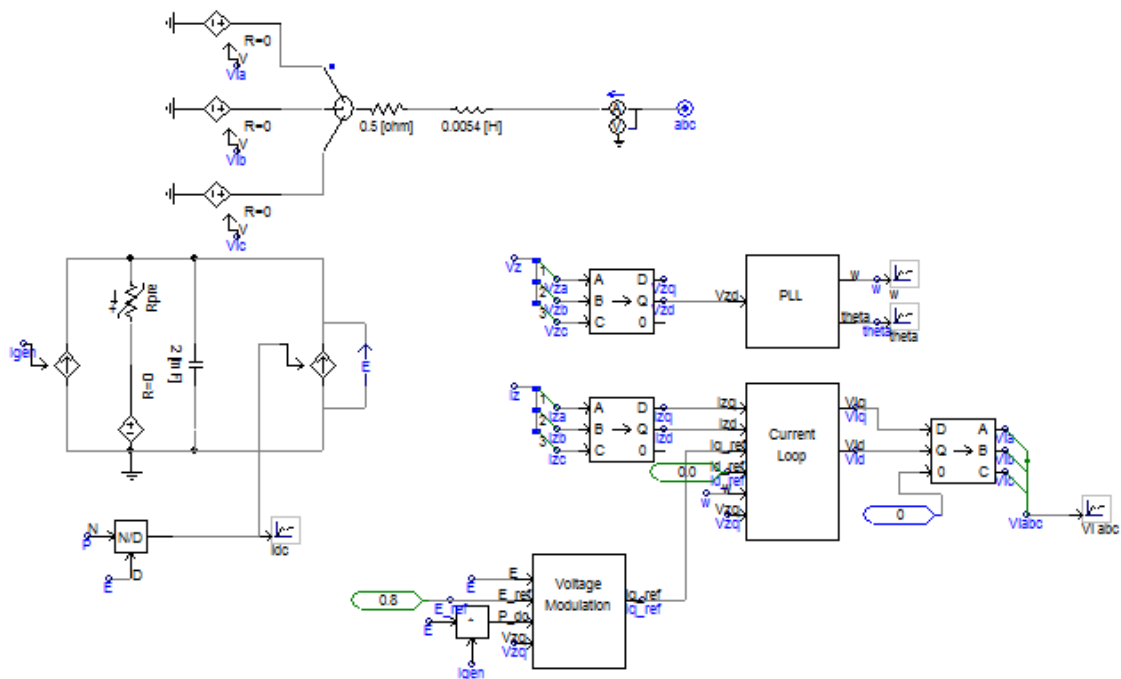


Figura 5.18. Esquema complet en PSCAD del model promitjat

5.3- Model complet

Un cop completat el model simplificat, es va decidir modelar el convertidor VSC complet incloent els IGBT. Aquest serà el model de convertidor que es farà servir posteriorment per simular el parc, per tant serà necessari que sigui de major potència (aproximadament 1 MW). Els blocs de control principals (PLL, Llaç de corrent, Llaç de tensió...) segueixen el mateix esquema que ja s'ha comentat amb anterioritat així que no es tornaran a explicar. Evidentment cal modificar l'esquema elèctric del convertidor per incorporar els IGBT, amb els corresponents blocs de control que generen les senyals necessàries per la commutació. Aquest apartat es centrarà en explicar les diferències que cal afegir per tenir el model complet i per dimensionar-lo per tal que sigui capaç de generar la potència desitjada.

5.3.1- Esquema elèctric

El convertidor VSC es basa en tres branques amb dos IGBT a cada branca. Els punts mitjos de cada branca es connecten a la xarxa a través d'inductàncies i resistències. Les inductàncies permeten connectar-se suaument a la xarxa. Una commutació adequada dels IGBT permetrà modular les tensions per obtenir el senyal trifàsic desitjat i poder controlar el flux de potència activa i reactiva injectada a la xarxa. En la Figura 5.19 podem veure l'esquema del convertidor estudiat.

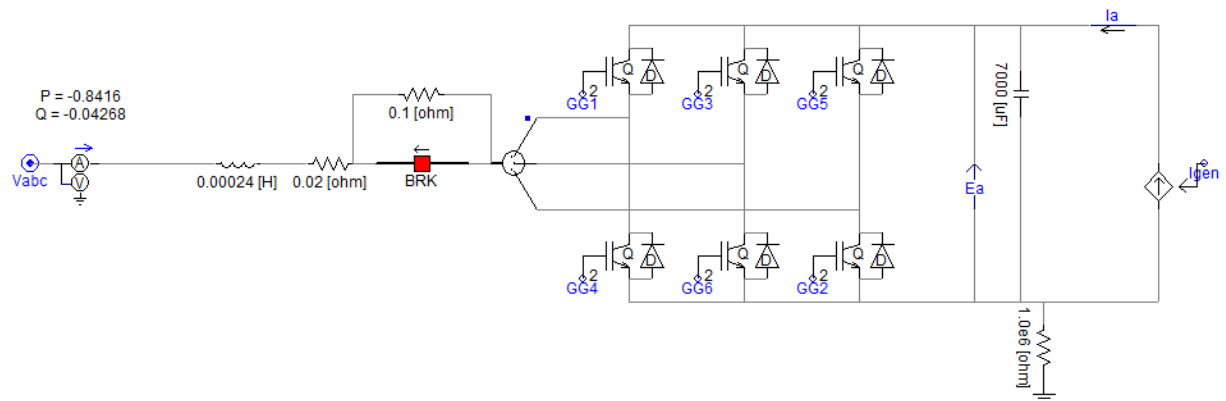


Figura 5.19. Esquema elèctric d'un convertidor del tipus VSC implementat amb PSCAD

En aquest cas, la xarxa elèctrica (o el transformador, en el cas en que tinguem més d'un convertidor connectat al parc) aniria connectada al punt de l'esquerra, representat per la senyal V_{abc} . La xarxa segueix representant-se com un sistema de tensions trifàsic equilibrat. A l'altre costat tenim el bus de continu amb el condensador. La font de corrent segueix representant el conjunt de plaques solars connectades en sèrie i en paral·lel. Controlant aquesta corrent, podem simular variacions en la potència generada per les plaques.

El canvi més rellevant és, com ja s'ha mencionat, la incorporació dels sis IGBT. En aquest model, la part de contínua i la d'alterna ja no es simulen com a dos circuits elèctricament aïllats, sinó que estan connectats a través dels IGBT. Les senyals de control GG1 fins a GG6 representen les ordres de commutació. Més endavant s'explicarà com triar aquestes senyals per aconseguir les tensions desitjades.

De manera similar a com es feia en l'altre model, cal incorporar una resistència per carregar el condensador a l'inici de la simulació. Passats uns instants, aquesta resistència es curtcircuita i deixa d'actuar.

5.3.2- Modulació

La modulació de les tensions per obtenir el perfil d'ona desitjat es fa a partir del que es coneix com a *Pulse Width Modulation (PWM)* o Modulació per amplada de polsos. Aquesta tècnica es basa en utilitzar una senyal de polsos rectangulars d'un cert període determinat. En funció del percentatge del temps que el pols es troba en el seu valor alt o baix, el promig serà un valor comprès entre el màxim i el mínim. Així doncs, variant l'"amplada" del pols podrem obtenir senyal o un altre

La forma més simple de simular el PWM és amb una senyal triangular que anomenarem *Carrier* i una senyal que actua de referència. Amb l'ajuda d'un comparador, es crea una tercera senyal que valdrà 1 quan la referència és més alta que el *Carrier* i 0 en cas contrari. A continuació tenim un exemple d'aquestes senyals:

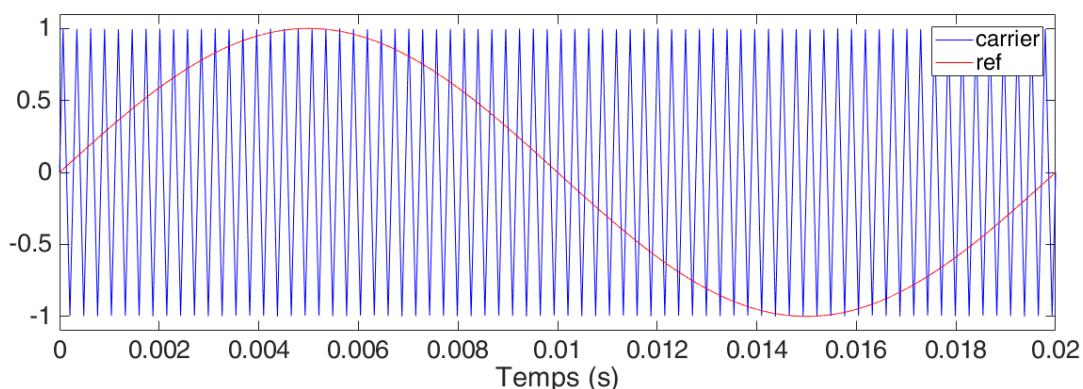


Figura 5.20. Senyal triangular (Carrier) i senyal de referència necessaris pel PWM

La Figura 5.20 mostra en blau el Carrier, una senyal triangular de 3600Hz i en verd la senyal sinusoidal de referència, de 50Hz (freqüència de la xarxa) que volem modelar. Comparant-les com s'ha explicat, amb un comparador, s'obté la senyal de la Figura 5.21.

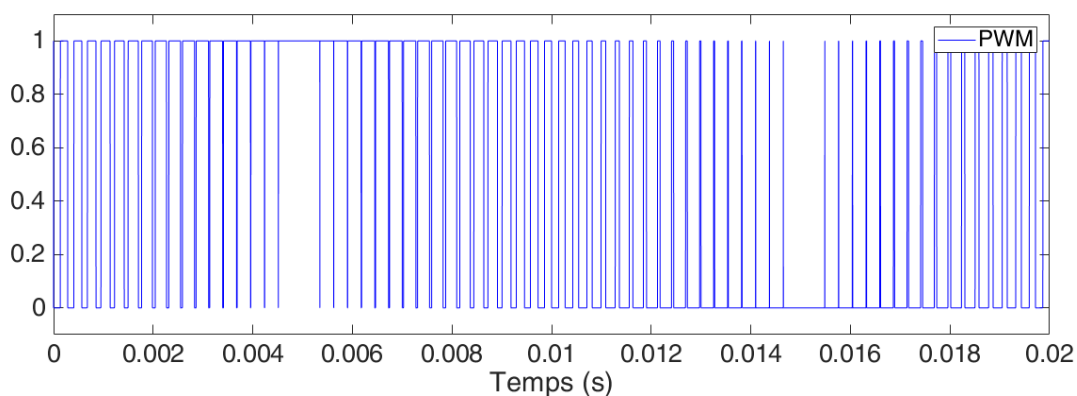


Figura 5.21. Senyal de sortida del comparador que es fa servir per la commutació dels IGBT

Com es pot observar, el valor mig de la senyal segueix el perfil del sinus de la Figura 5.20. La primera meitat del temps tenim que el graó està la major part del temps a valor alt, mentre que la segona part del temps tenim que es passa la major part del temps a 0.

En la Figura 5.22 podem veure la implementació amb PSCAD del PWM que s'ha explicat en aquest apartat. Es fa amb sis blocs pensats expressament per aquesta funció, que generen cadascun la senyal necessària per un dels IGBT [4]. Es pot veure també com es genera la senyal pel Carrier i com s'assigna a cada bloc un senyal de referència.

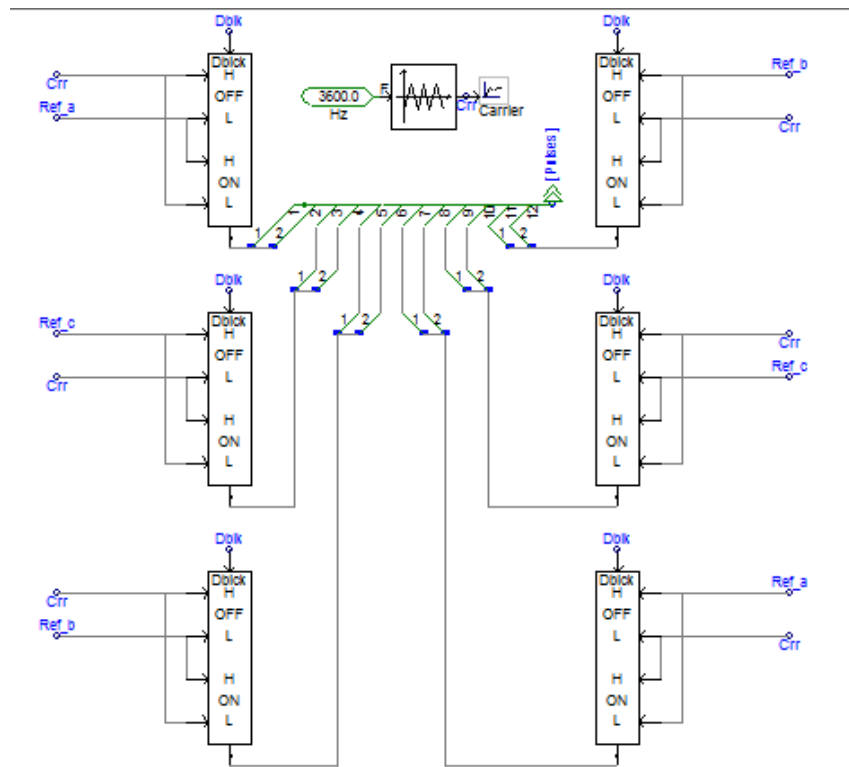


Figura 5.22. Implementació del PWM amb PSCAD

5.3.3- Control de potència reactiva

En aquest model s'hi incorpora un bloc per controlar la potència reactiva, ja que es desitja poder donar una consigna de P i Q al convertidor i que aquest la segueixi amb la i_q i la i_d apropiades. La següent Figura 5.23 mostra la implementació del control.

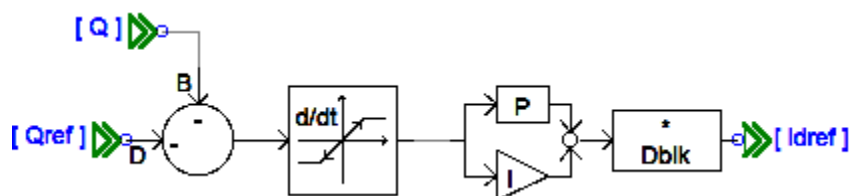


Figura 5.23. Control de potència reactiva

Es pot veure com primer es calcula l'error entre la consigna de referència i la potència instantània, es limita amb una rampa (per evitar variacions brusques del tipus graó) i com a controlador es fa servir un PI. A la sortida, tenim la corrent de referència $i_{d\text{ ref}}$.

5.3.4- Model complet en PSCAD

En la següent figura es mostra la implementació del model en PSCAD

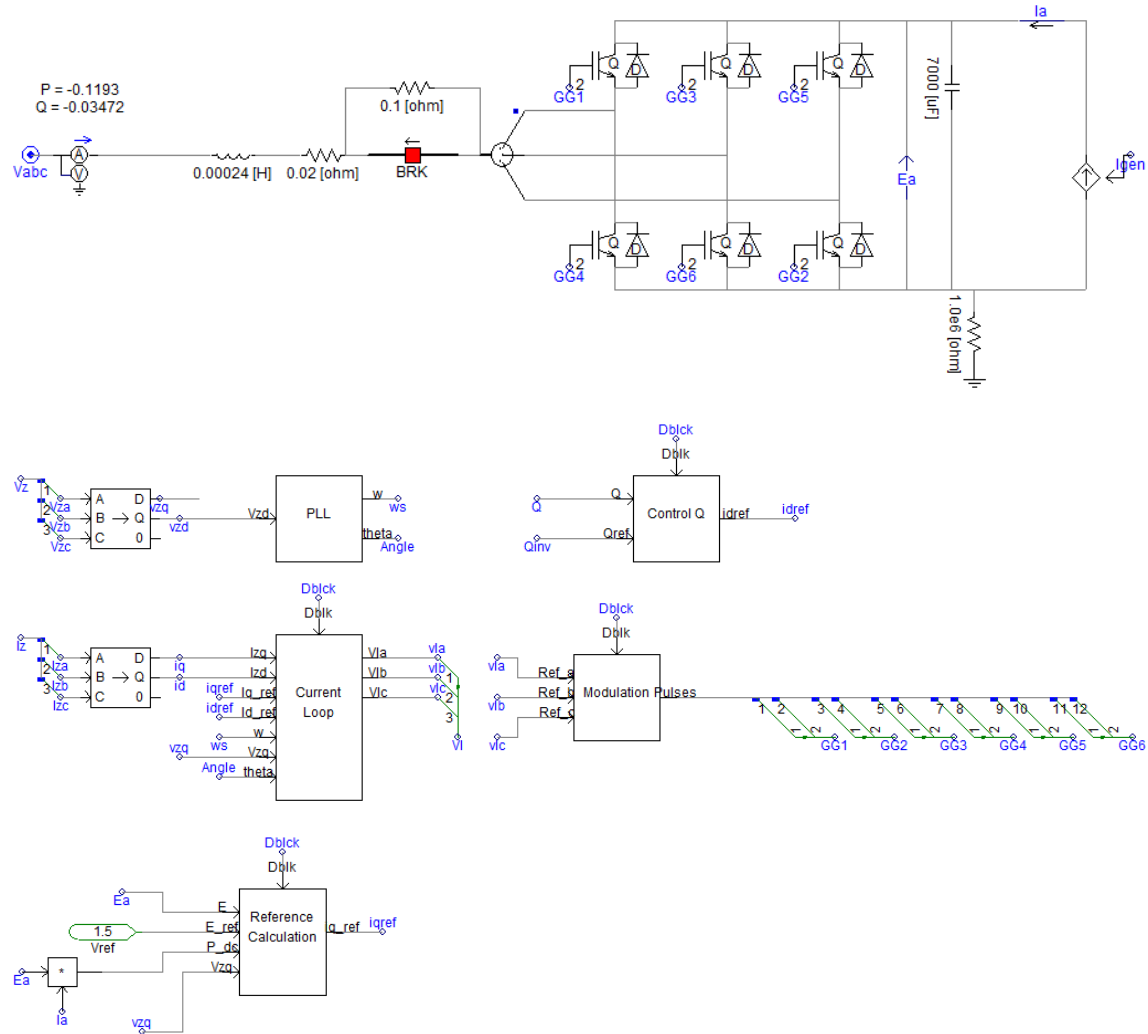


Figura 5.24. Implementació del model en PSCAD

En ella podem veure tots els blocs que s'han explicat, amb les corresponents variables d'entrada i sortida de cada un.

6- Power Plant Control

El Power Plant Control (PPC) permet controlar la potència activa i reactiva que subministra la planta al punt de connexió amb la xarxa, també conegut com a *Point of Common Coupling* (PCC). La seva dinàmica ha de ser més lenta que la dels sistemes que formen la planta, com podrien ser els convertidors. A partir d'una referència fixada per l'operador de la xarxa o *Transmission System Operator* (TSO) s'ha d'enviar a cada convertidor el punt de funcionament apropiat per complir amb les especificacions i garantir l'estabilitat de la xarxa. La Figura 6.1 mostra l'esquema del control d'una planta, on es poden veure els diferents elements que la formen i l'intercanvi d'informació entre ells.

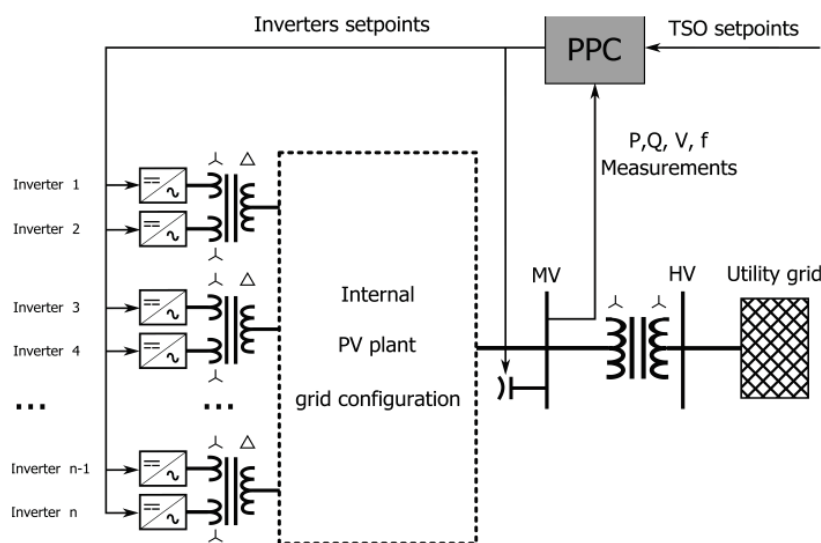


Figura 6.1. Power Plant Control d'una planta solar, amb els senyals d'entrada i sortida [5]

A continuació s'explicarà com es dissenya el PPC quins elements el formen per tal de complir amb les especificacions (*TSO setpoints*).

6.1- Potència activa

Per tal de mantenir la freqüència de la xarxa dins uns límits, cal que hi hagi equilibri entre la potència activa generada i la demanda. Algunes plantes solars poden estar obligades a mantenir un control sobre la potència activa per contribuir a la regulació de la freqüència.

També es pot donar el cas que no hi ha cap variació de freqüència a corregir, però el TSO ens demana injectar una determinada potència al PCC. Aleshores, la planta ha de ser capaç d'enviar les ordres apropiades a cada convertidor per ajustar-se al nou punt de funcionament. Les variacions poden estar limitades a uns certs kW/s per evitar canvis bruscs al PCC. En la següent figura podem veure un esquema general d'un control de potència activa.

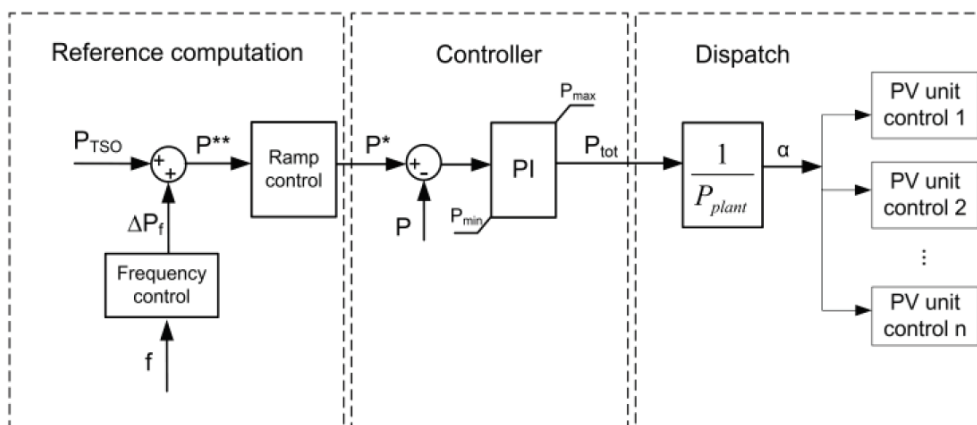


Figura 6.2. Control de potència activa [5]

Com es pot veure, el controlador té en compte l'error entre la potència activa desitjada, P^* i la potència activa generada instantàniament P . La P^* es calcula, com ja s'ha comentat, a partir d'una potència imposada en funció de la demanda i tenint en compte el control de la freqüència de la xarxa. A la sortida del controlador tenim la potència total que s'ha de generar. Aquesta es divideix per la potència nominal de la planta P_{plant} i s'obté un valor α (en p.u.) que s'envia a cada convertidor. Aquest valor representa el seu punt de funcionament, i la potència que generarà cada unitat dependrà de la seva potència nominal. El control propi de cada convertidor s'encarregarà d'assolir el nou punt de funcionament.

6.2- Potència reactiva

El control de potència reactiva permet mantenir la tensió al PCC dins uns límits. El cas més comú és que l'operador de la xarxa especifiqui la potència reactiva que s'ha d'injectar (o consumir) en el PCC. Per assolir aquest punt, s'utilitza un esquema de control com el de la Figura 6.3. El PPC pot rebre tres consignes diferents: primer, pot rebre una consigna de potència reactiva Q_{TSO} , que és la potència (limitada amb una rampa) que cal injectar al PCC. El segon cas és una referència de voltatge V_{TSO} que es compara amb el voltatge actual per calcular la nova consigna de potència. Per últim, pot rebre un factor de potència $\cos(\phi)$ que junt amb la potència activa mesurada, ens proporcionarà la potència reactiva que cal generar.

La consigna de reactiva (obtinguda amb un dels mètodes anteriors) es compara amb la potència mesurada per obtenir l'error. Igual que fèiem per al control de potència activa, es fa servir un controlador PI per obtenir la nova potència que cal generar, i es reparteix la consigna a cada convertidor mitjançant la variable β (en p.u.). Aleshores cada convertidor s'encarrega d'assolir el nou punt de funcionament amb el seu propi control.

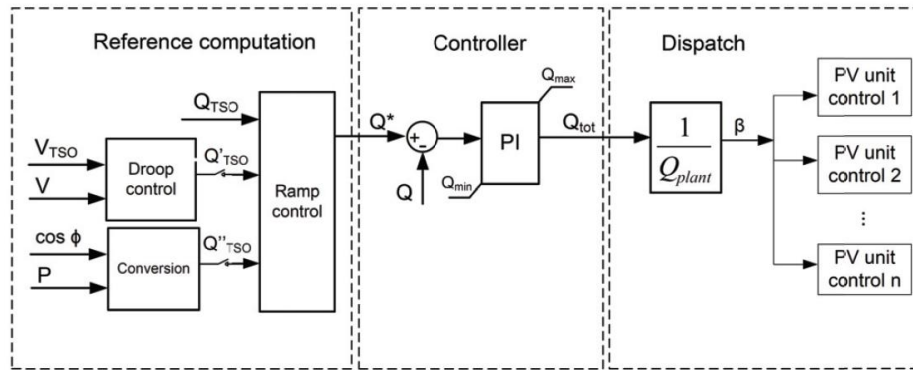


Figura 6.3. Control de potència reactiva [5]

6.3- Implementació dels controls amb PSCAD

Els controls descrits a l'apartat anterior han sigut implementats amb PSCAD com a subsistemes que, donades les consignes de P i Q de la planta, proporcionen la i_{gen} (corrent generada, que es fa servir per la font de corrent del bus de contínua del convertidor) i la Q_{inv} (potència activa que ha de generar cada convertidor). Recordem que cada convertidor té el seu propi control que calcula la corrent i_{dref} en funció de la potència reactiva que ha de generar.

La Figura 6.4 mostra el control de potència activa. Observem com la potència activa es compara amb una referència per obtenir l'error. La sortida del PI es divideix per la tensió del bus de contínua per tenir una intensitat, i el factor 0.2 divideix la potència entre els cinc convertidors que tindrà el nostre parc (més endavant es comentarà el disseny del parc).

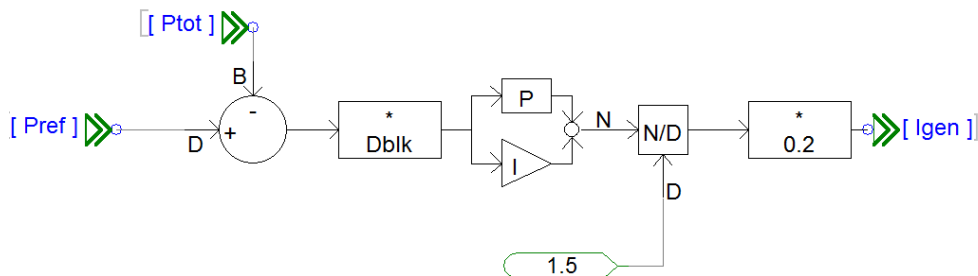


Figura 6.4. Control de potència activa

La Figura 6.5 mostra el control de potència reactiva. En aquest cas podem veure que s'ha limitat la variació de potència a una rampa, per evitar canvis bruscs. Tornem a veure el factor 0,2 que divideix la potència entre els cinc convertidors. A la sortida tenim Q_{inv} que és la variable d'entrada del convertidor.

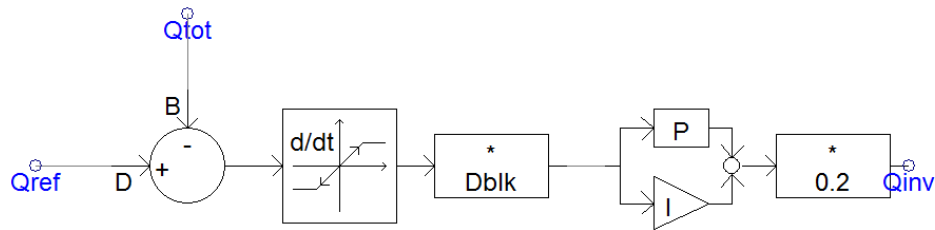


Figura 6.5. Control de potència reactiva

6.4- Model parc fotovoltaic

En aquest capítol s'explicarà el model de planta fotovoltaica que s'ha fet servir per simular. Es comentaran els diferents elements (convertidors, transformadors i línies) i com estan connectats entre si.

El parc consta de 5 convertidors connectats cadascun a un transformador que eleva la tensió de 0,4 kV a 20 kV. Es connecten tots cinc en anell, i es connecta a la xarxa de 20 kV també. A cada línia s'hi associa una certa resistència i inductància. Per completar el model, s'afegeixen condensadors per ajudar a la generació de reactiva. El model resultant amb PSCAD el podem veure a la Figura 6.6.

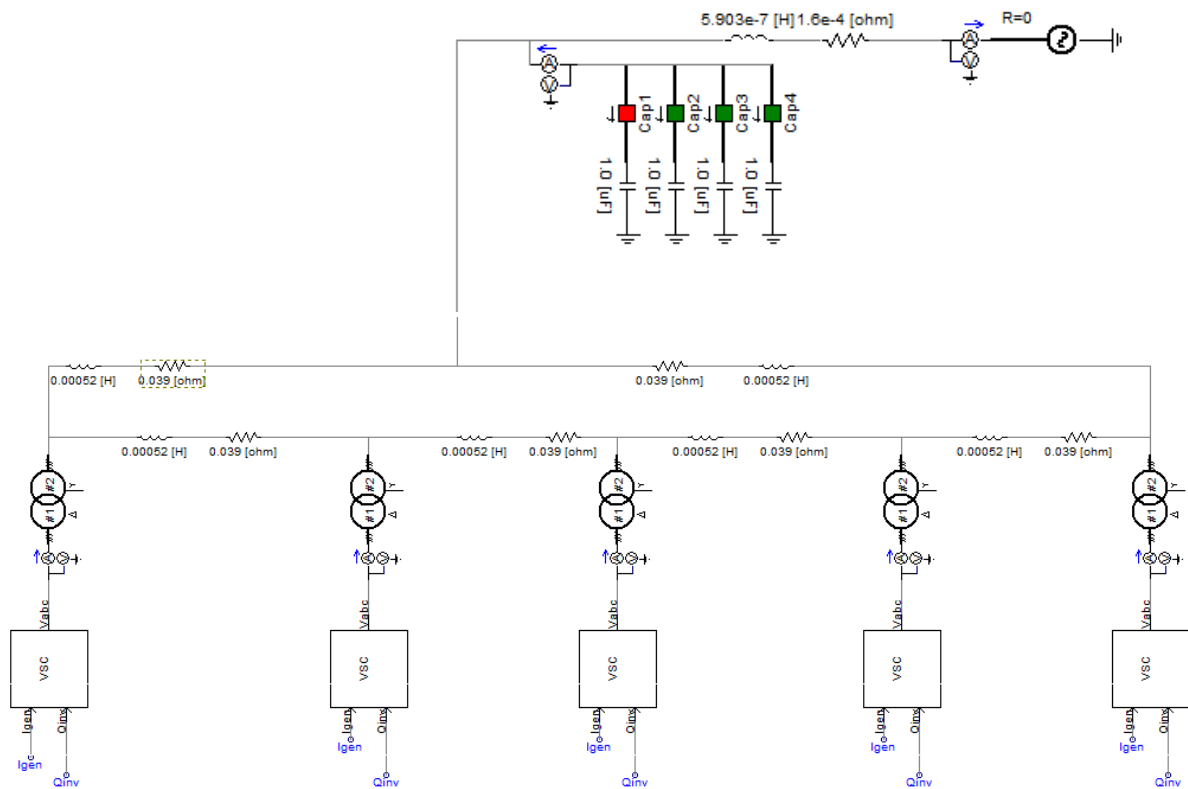


Figura 6.6. Model del parc fotovoltaic

7- Resultats de les simulacions

7.1- Simulació model simplificat

S'ha dut a terme una simulació d'aquest model amb PSCAD amb l'objectiu d'aprendre el comportament del convertidor i com a pas previ a la simulació del model complet, ja que aquest segon és més complex. Es tracta d'un convertidor d'uns 10 kW de potència i 800 V en el bus de contínua. Com a consigna s'han fet servir una sèrie de graons de corrent, que podrien representar les variacions de potència generada per la planta. Durant la simulació, el convertidor injecta potència a la xarxa i ha de controlar la tensió DC per garantir el balanç de potència. Aquesta simulació es va fer amb l'objectiu d'aprendre i il·lustrar el funcionament del convertidor, però no es farà servir més endavant com a part del parc fotovoltaic. A continuació es presenten i els resultats obtinguts de les diferents variables elèctriques al llarg del temps.

7.1.1- Tensions

Les figures 7.1 i 7.2 representen respectivament un detall de les tensions de la xarxa i les tensions de la part d'alterna del convertidor. Evidentment es tracta d'unes tensions trifàsiques, de forma sinusoidal i desfasades entre si. En no haver-hi commutacions dels IGBT observem que hi ha molt poc soroll. Sobretot pel que fa al costat del convertidor, cal destacar que la ona és quasi perfecta.

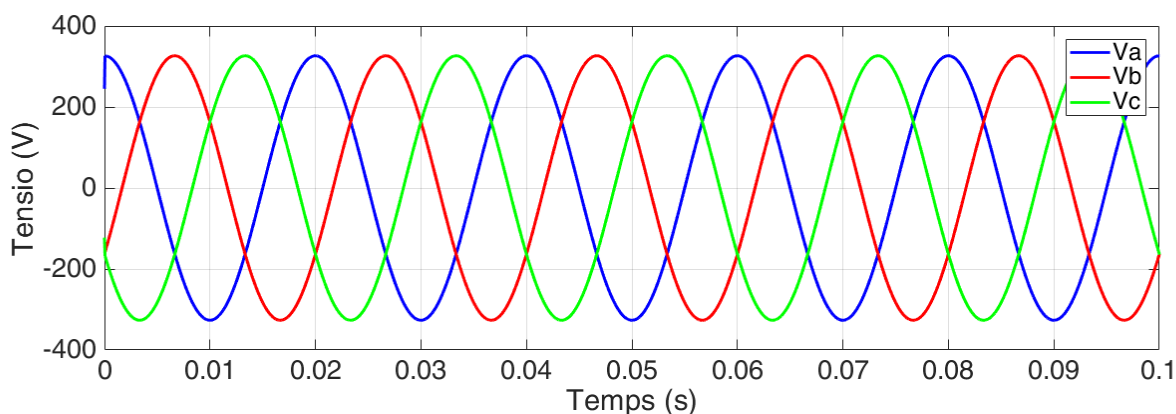


Figura 7.1. Detall de les tensions de la xarxa elèctrica

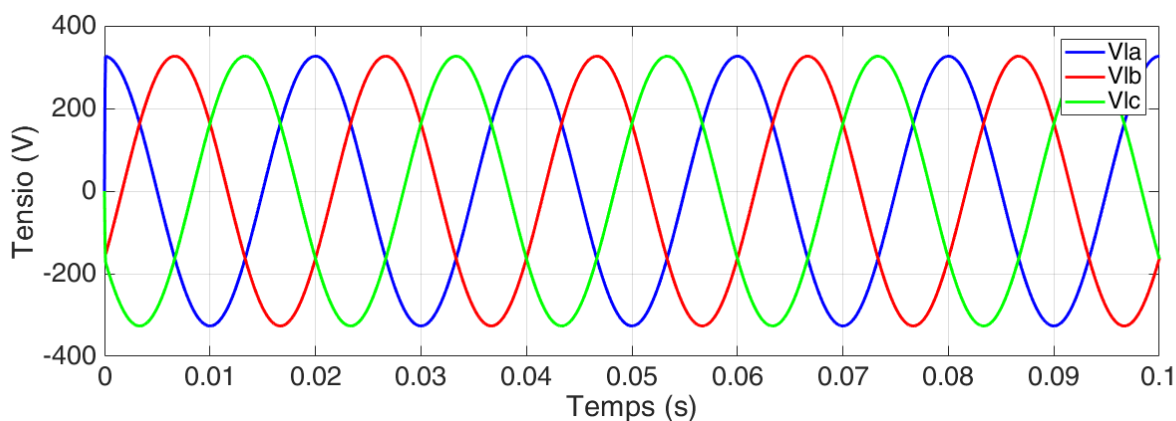


Figura 7.2. Detall de les tensions de la part trifàsica del convertidor

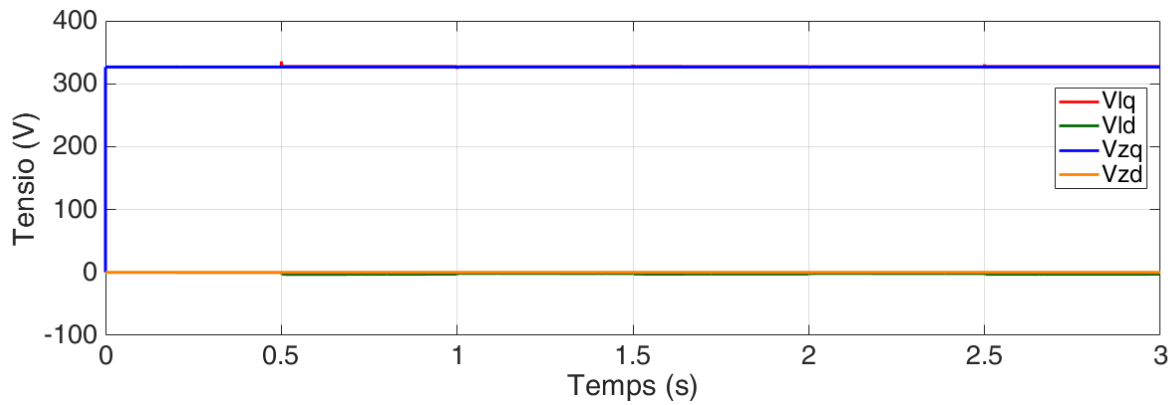


Figura 7.3. Tensions del convertidor en referència qd0

La Figura 7.3 mostra les tensions del convertidor en la referència qd0. Observem que en aquest cas, no hi havia consigna de potència reactiva i les components d es mantenen a 0. Tot seguit es mostra un detall de la component q de les tensions.

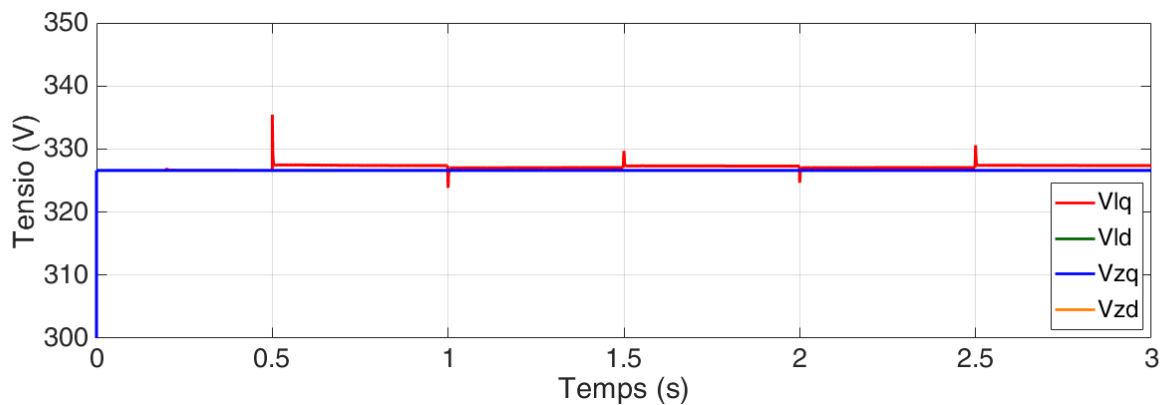


Figura 7.4. Detall de les tensions del convertidor en referència qd0

7.1.2- Corrents

En la Figura 7.5 es poden veure les corrents de la xarxa al llarg de la simulació. Es pot veure com l'amplitud s'adapta a les variacions de consigna.

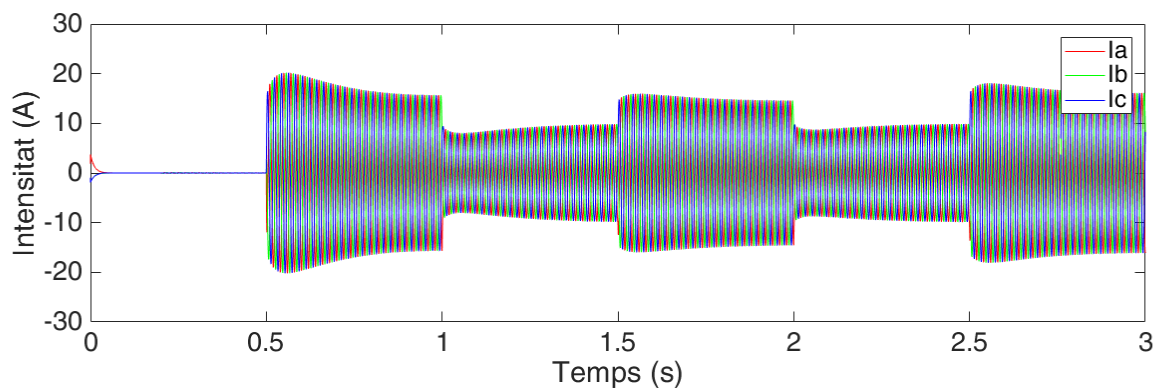


Figura 7.5. Corrents en referència abc

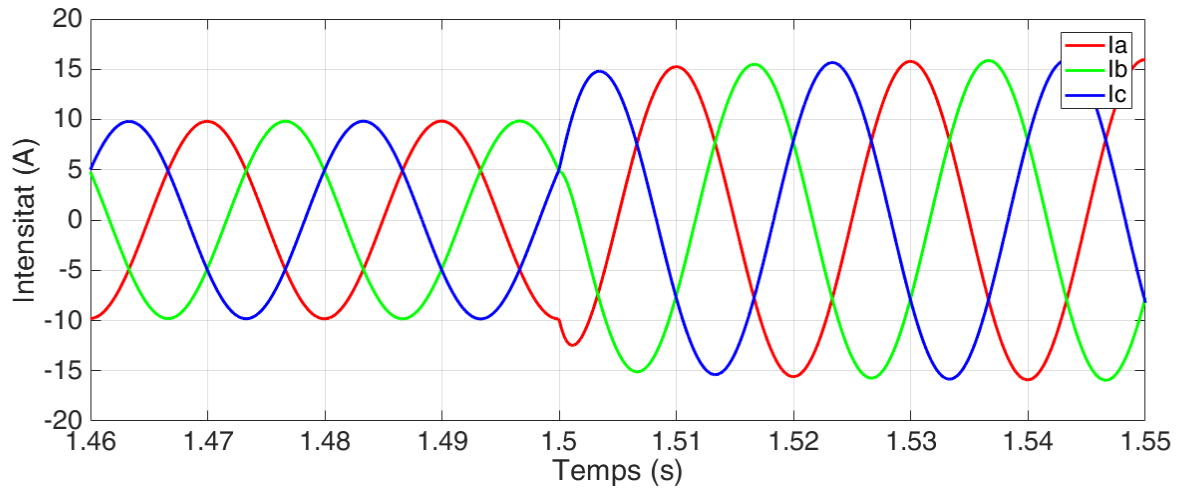


Figura 7.6. Detall del canvi de consigna, al segon 1,5 de la simulació

Es pot observar com l'amplitud de la intensitat s'adapta als valors de les consignes. Si la tensió es manté constant (gràcies al llaç de tensió) això es traduirà en variacions de potència.

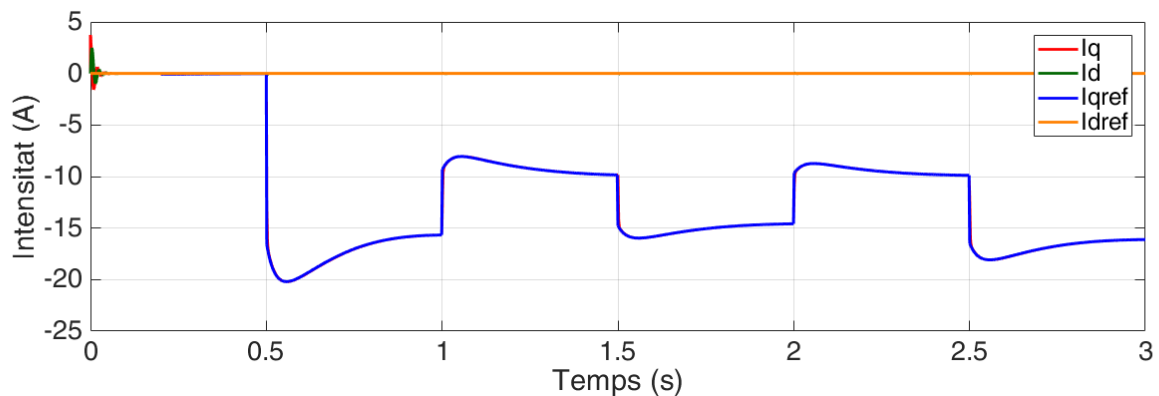


Figura 7.7. Corrents en la referència qd0

Altres cops, les corrents en la referència d són nul·les. El fet que les corrents en la referència q es mostrin negatives es deu a la referència que s'ha fet servir al mesurar-les (es poden agafar positives en un sentit o en l'altre).

7.1.3- Potència

La següent figura mostra la potència activa generada pel convertidor. Podem observar com la potència s'adapta quan hi ha un canvi de referència.

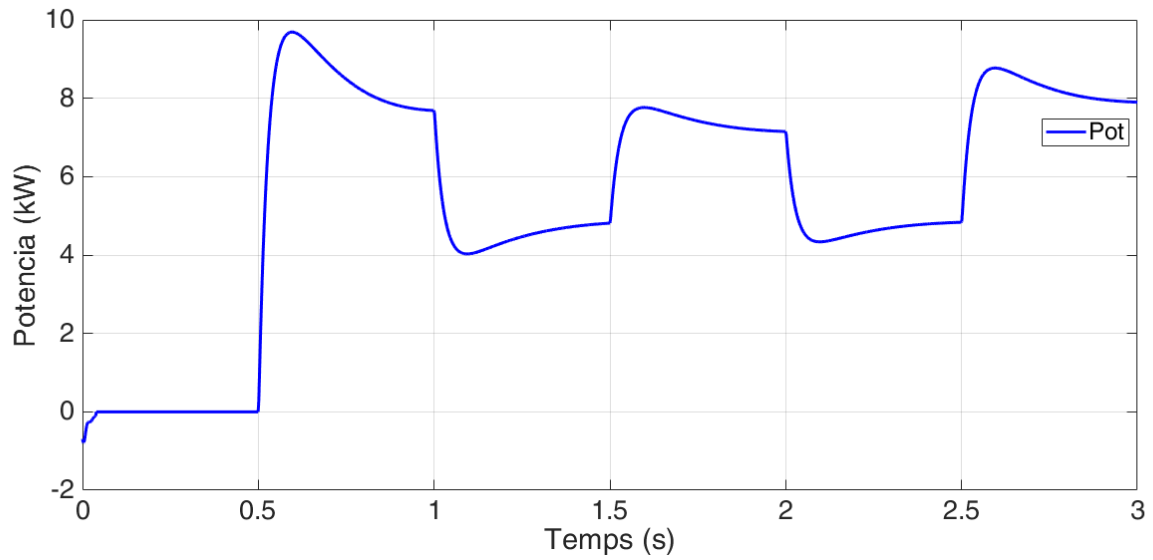


Figura 7.8. Potència activa generada pel convertidor

7.2- Simulació del model complet

En aquest apartat es presentaran els resultats obtinguts en simular el model complet durant 4 segons, fent servir com a consigna una sèrie de graons que representaran diferents nivells de potència generada. Aquest convertidor serà el que es farà servir més endavant pel model del parc fotovoltaic, per tant s'ha dissenyat perquè sigui capaç de generar fins a 1 MW de potència. L'objectiu serà veure com el convertidor s'adapta als diferents punts de funcionament i verificar que el seu comportament és estable. Els paràmetres del convertidor s'afegiran a l'annex B.

7.2.1- Phase Locked Loop

Primer de tot es mostra la resposta de la PLL. Podem observar que hi ha un cert transitori a l'inici de la simulació i després s'estabilitza entorn el valor de referència. Cal recordar que la resposta no comença en 0, ja que s'ha fet un *feed forward* amb el valor 100π per evitar tenir un error molt gran a l'inici de la simulació. Al segon 0.5 la senyal Dbclk passa a valdre 1 (s'inicien tots els controls) i apareix un cert soroll en la resposta. Podem veure com es van corregint els errors provocats pels canvis de consigna.

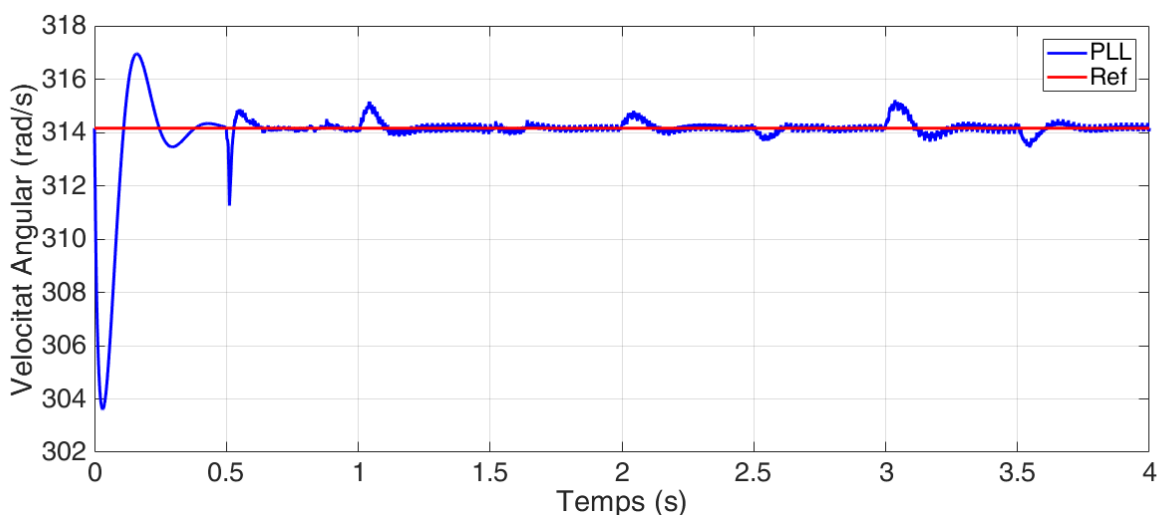


Figura 7.9. Resposta de la PLL

7.2.2- Tensions

A continuació es mostra el valor de les tensions del model. La primera imatge, la Figura 7.10, mostra el valor de les tensions de la part d'alterna del convertidor.

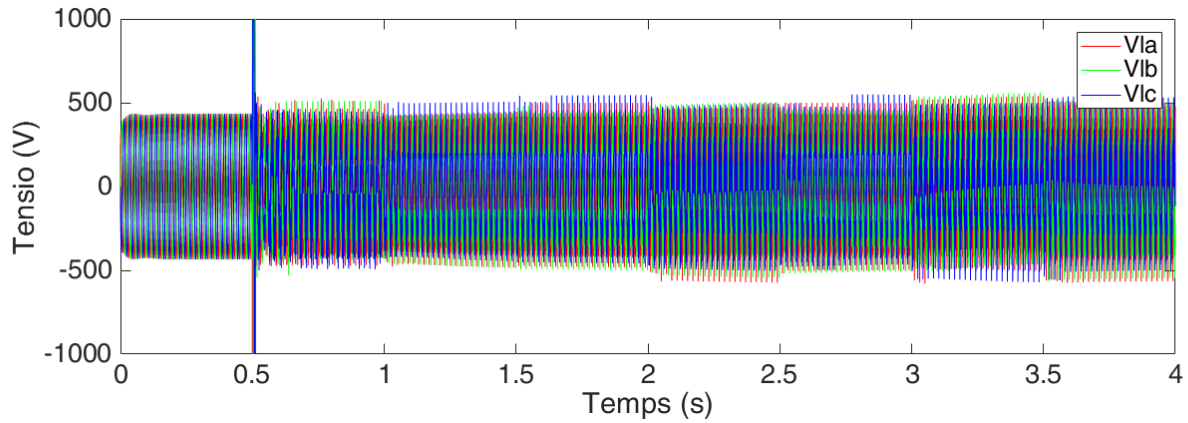


Figura 7.10. Tensions de la part alterna del convertidor

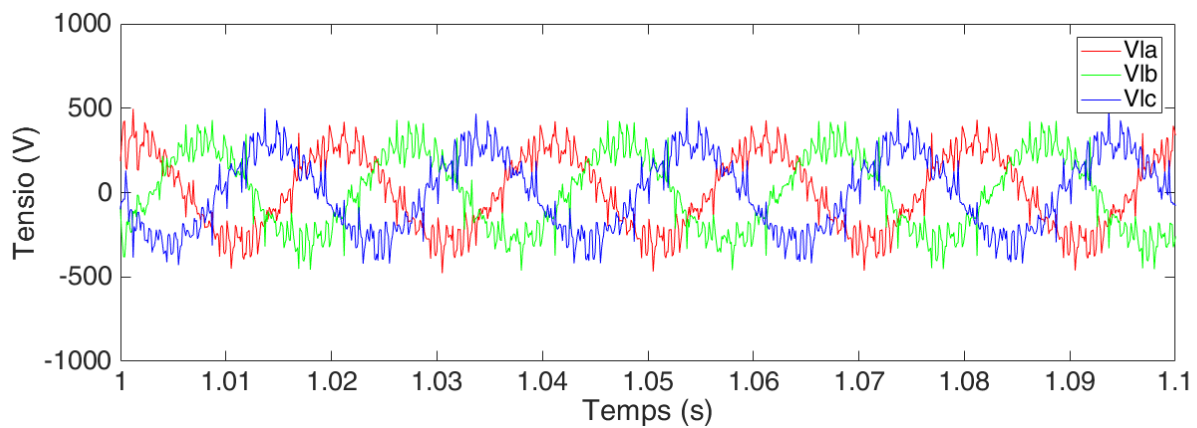


Figura 7.11. Detall de les tensions de la part d'alterna del convertidor

Observem que es tracta d'una tensió trifàsica, de valor màxim uns 400V, però apareix molt més soroll que en la simulació que es feia amb el model promitjat. Això és degut a les commutacions dels IGBT.

La següent imatge mostra les tensions en la referència qd.

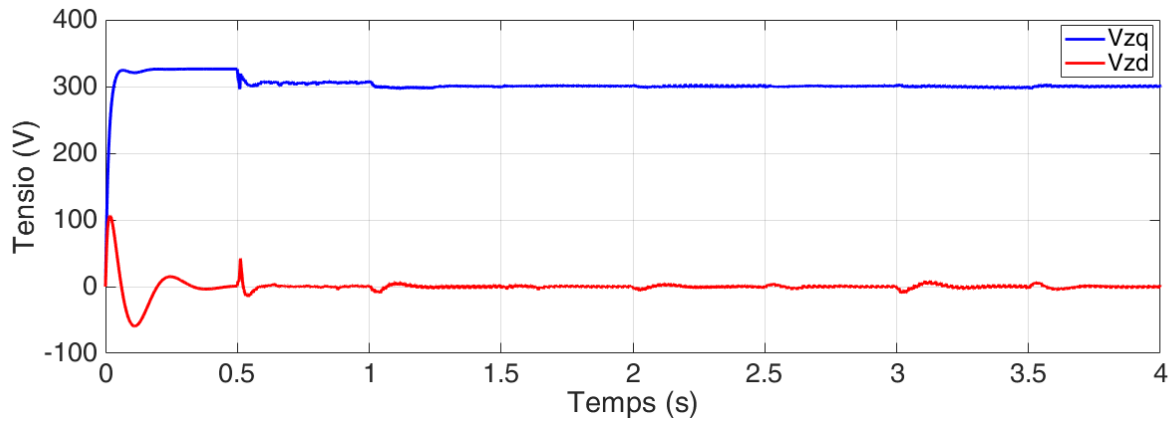


Figura 7.12. Tensions en la referència qd

Tot seguit es mostrarà la tensió del bus DC. En aquest cas, la referència (en vermell) es va fixar a 1500V. Podem veure com la tensió real segueix la referència i corregeix les pertorbacions provocades per canvis de consigna en la potència. Com ja s'ha explicat, és important que la tensió del bus DC es mantingui constant per assegurar el balanç de potència.

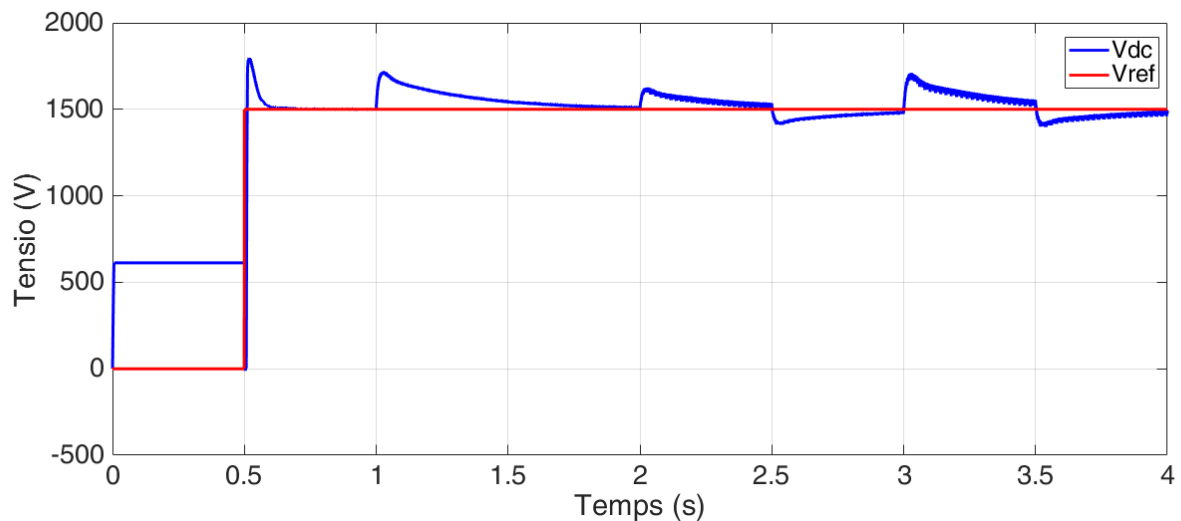


Figura 7.13. Tensió del bus de contínua (blau) i tensió de referència (vermell)

7.2.3- Corrents

En la Figura 7.14 es mostren els corrents del convertidor en referència abc. Podem veure que després d'un transitori, els corrents augmenten o disminueixen en funció de la consigna de potència que hem imposat.

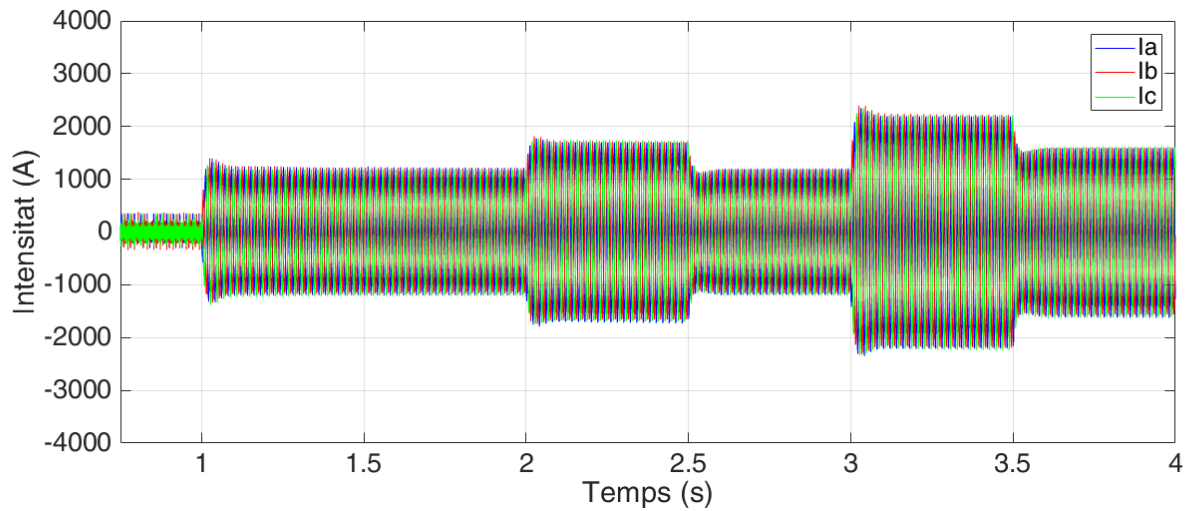


Figura 7.14. Corrents en referència abc

Les mateixes corrents en referència qd es mostren en la Figura 7.15.

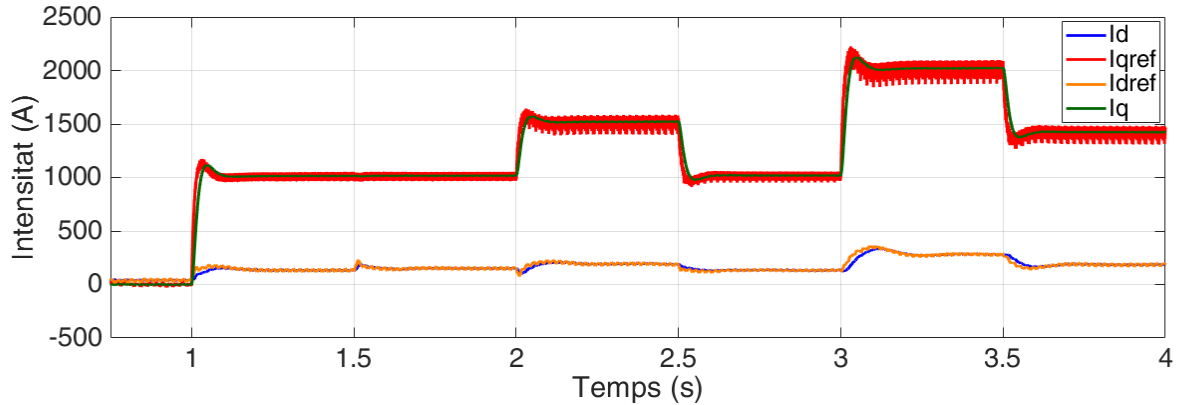


Figura 7.15. Corrents en referència qd

En aquest cas, la consigna de potència reactiva no era nul·la i per tant les corrents en la referència d són diferents de 0. En els dos casos, les corrents s'adapten al valor de la consigna amb un cert soroll degut, com ja s'ha comentat, a les commutacions dels IGBT.

7.2.4- Potència

Finalment, comprovem que la potència generada és la que havíem imposat a la referència. La Figura 7.16 mostra la potència activa injectada pel convertidor a la xarxa.

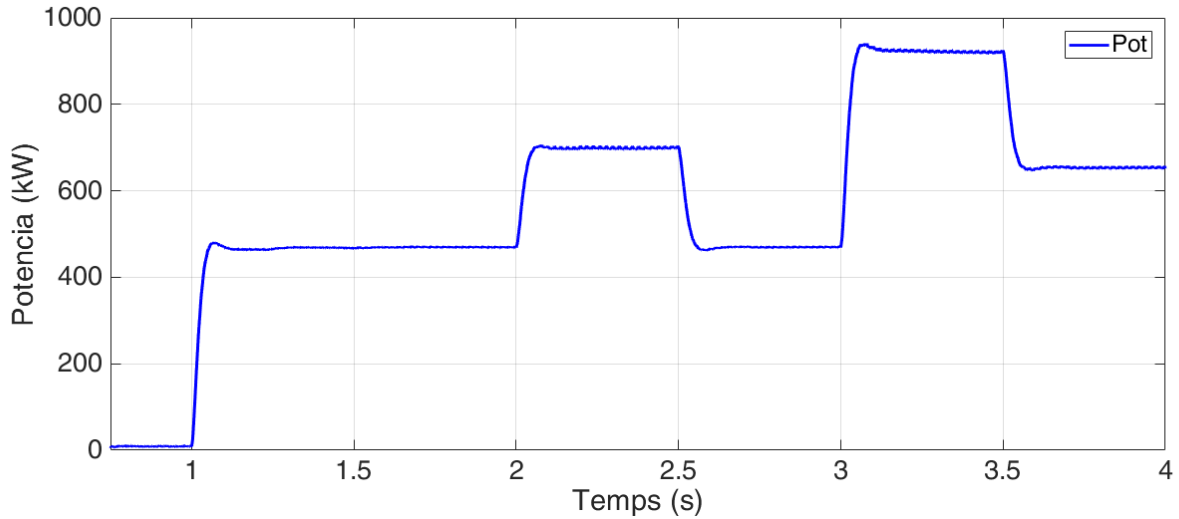


Figura 7.16. Potència activa injectada a la xarxa

I la Figura 7.17 mostra la potència reactiva.

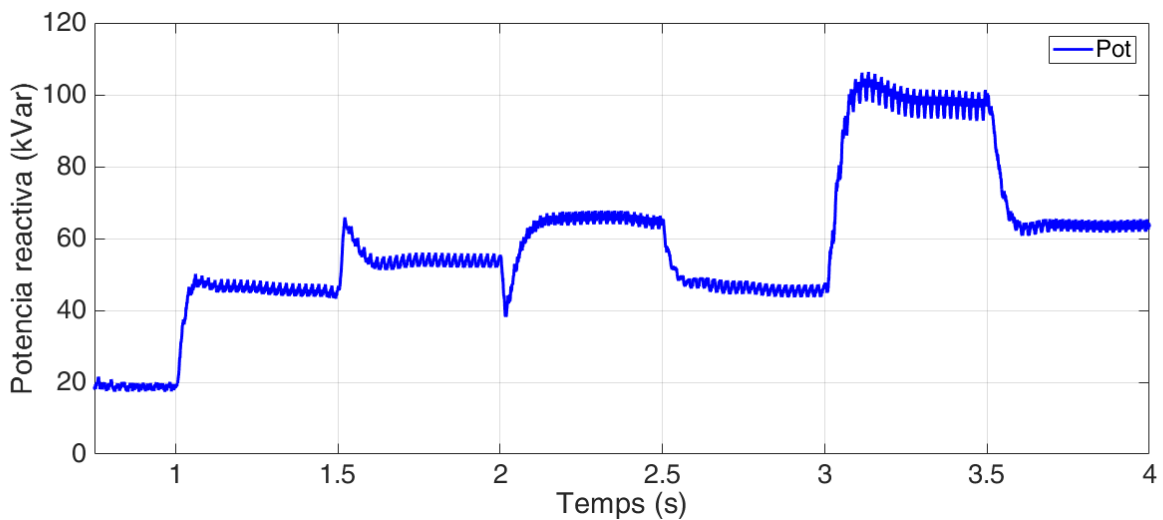


Figura 7.17. Potència reactiva injectada a la xarxa

Els dos gràfics segueixen un perfil similar a una sèrie de graons, que són les dos referències que s'han introduït al convertidor per aquesta simulació.

7.3- Simulació parc complet

En el següent apartat es presenten i es comenten els resultats de la simulació del parc davant diferents circumstàncies.

7.3.1- Canvis de consigna

La primera simulació s'ha fet aplicant només canvis de consigna de potència activa i reactiva per veure com evolucionen les variables davant les pertorbacions.

La Figura 7.18 mostra la potència activa mesurada al PCC (blau) i la potència de referència (vermell).

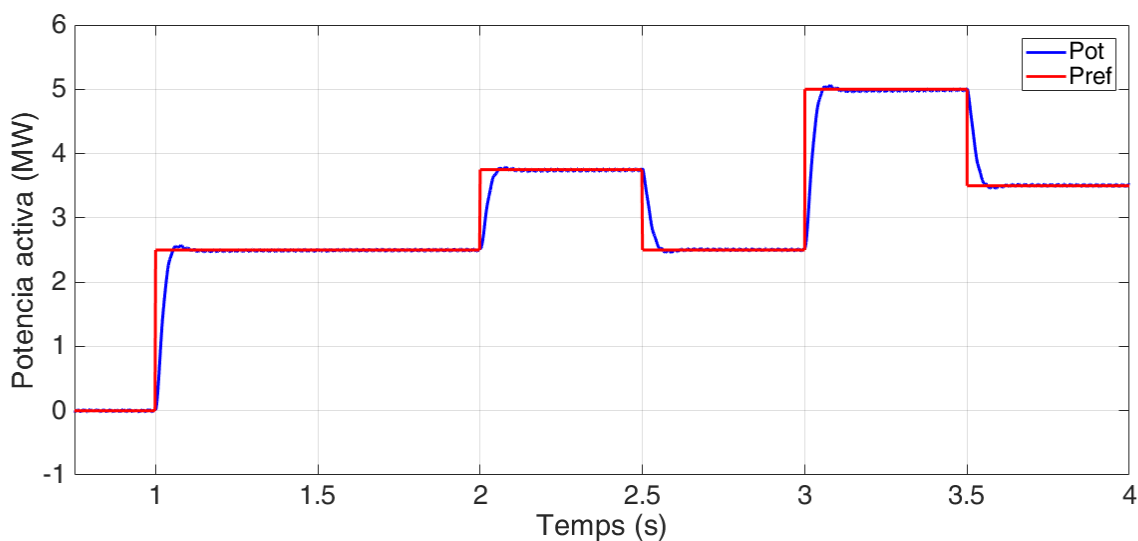


Figura 7.18. Potència activa mesurada al PCC (blau) i potència activa de referència (vermell)

Observem que hi ha un estat transitori en el segon 0,5 de simulació, degut a que en aquest instant es connecta el control. A partir d'aquí, la potència mesurada segueix perfectament la referència. En el punt màxim, es demanen 5 MW al parc, per tant, cada convertidor és capaç de donar 1 MW de potència.

La Figura 7.19 mostra la potència reactiva mesurada en el PCC (blau) i els canvis de consigna (vermell).

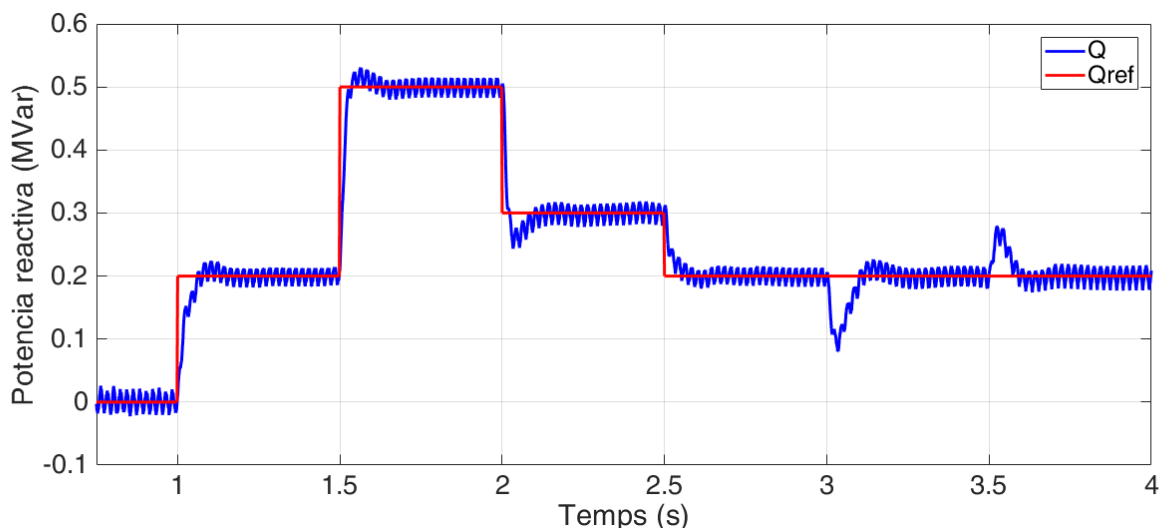


Figura 7.19. Potència reactiva mesurada al PCC (blau) i potència reactiva de referència (vermell)

Observem que el seu comportament és semblant al comportament de la potència activa. També tenim un estat transitori al segon 0,5 i a partir d'aquí la potència segueix el perfil que volem.

La potència reactiva no és generada tota pels convertidors, ja que tenim altres aparells que ajuden a generar-la. Els condensadors proporcionen graons discrets de reactiva. Quan la referència supera un cert nivell, s'activen més o menys condensadors, en funció de la potència que han de generar. Tenen preferència davant el control de potència del convertidor, ja que s'han instal·lat específicament per aquesta funció. Com que només poden proporcionar un nombre limitat de valors de Q, els convertidors acaben d'afinar el valor de potència generada. En la següent imatge podem veure com els condensadors es connecten i es desconnecten en variar la consigna.

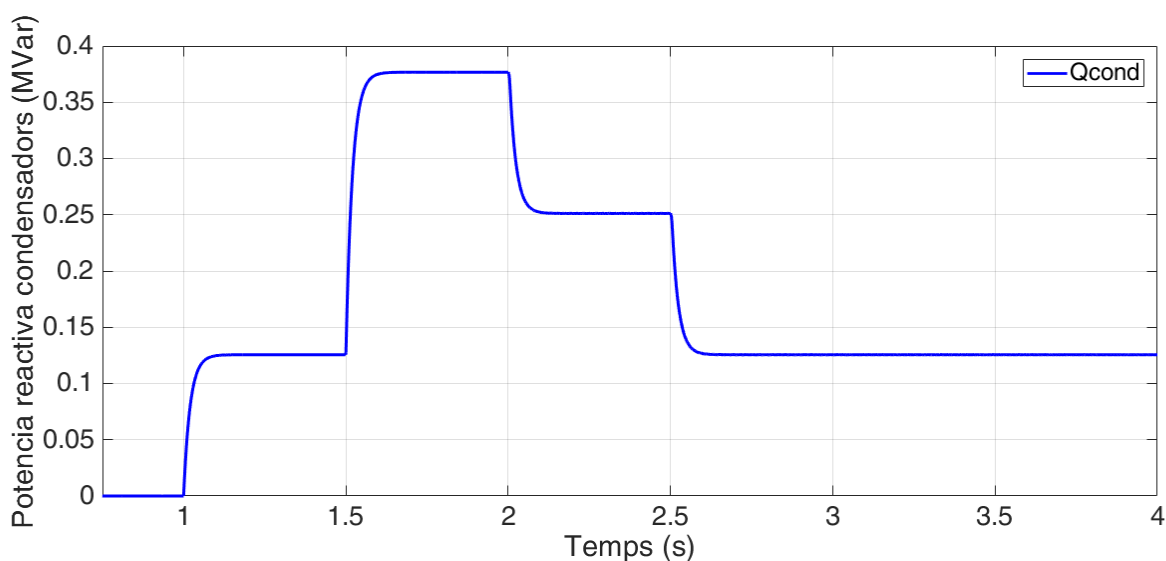


Figura 7.20. Potència reactiva generada pels condensadors

7.3.2- Reducció de la potència per efecte d'un núvol

En aquest apartat s'ha volgut estudiar què passaria si una part de la planta deixés de produir energia, per exemple perquè un núvol tapés progressivament part de les plaques durant un cert període de temps i després s'esvaís. Per simular aquesta situació, s'ha forçat que un dels convertidors deixa de injectar potència tot i rebre la consigna de fer-ho. Quan això passi, el PPC hauria de detectar-ho i solucionar-ho fent que els altres convertidors treballin més per substituir el que ha deixat de funcionar. A continuació es mostren els resultats de la simulació.

Primer de tot, veiem com es veuen afectades les corrents del convertidor. La Figura 7.21 mostra la disminució de les corrents entre els segons 1,2 i 1,8.

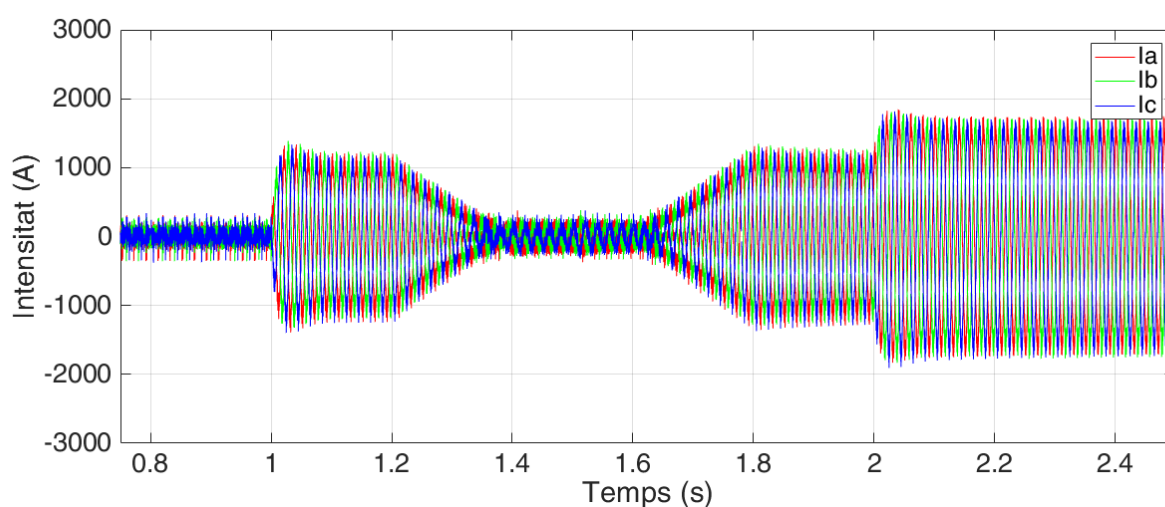


Figura 7.21. Disminució inesperada de les corrents injectades pel convertidor

La Figura 7.22 mostra com el PPC s'adapta a aquesta situació. S'observa que hi ha una lleugera disminució de la potència injectada en el moment en que un dels convertidors deixa de funcionar, però és corregit pel control. Quan es torna a connectar el convertidor provoca un lleuger augment de la potència, que es tradueix en una disminució de la consigna per corregir-lo. Al final, la potència segueix al valor de referència i la pertorbació quasi no ha afectat al funcionament del parc.

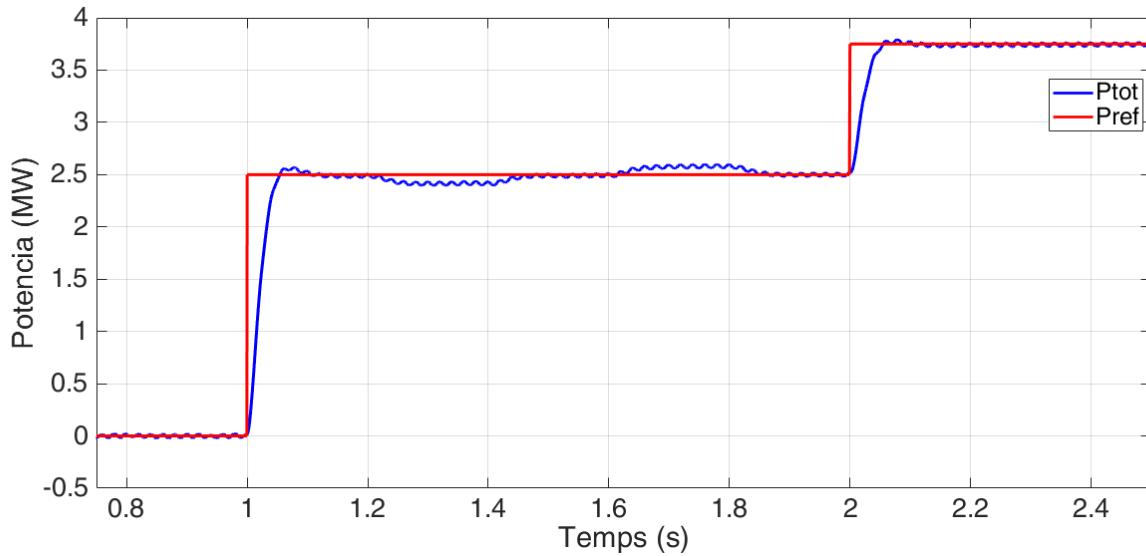


Figura 7.22. Potència activa injectada a la xarxa durant la fallada d'un dels convertidors

Per acabar, la Figura 7.23 mostra la potència activa injectada per dos dels convertidors. Un d'ells (P1) és el que deixa de funcionar i l'altre (P2) és un dels que segueixen funcionant.

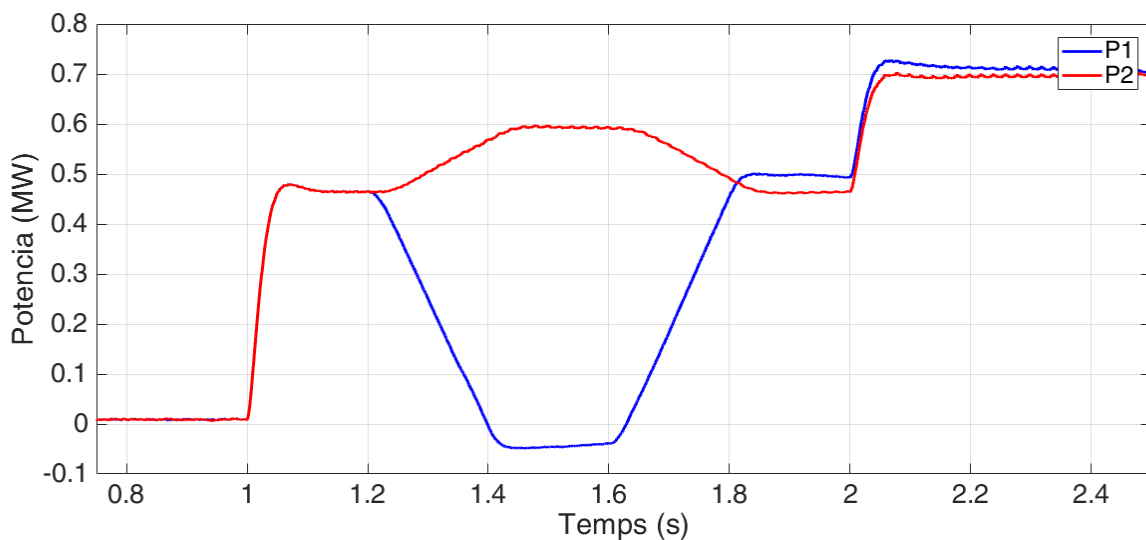


Figura 7.23. Comparació de potències entre dos convertidors durant l'aturada d'un d'ells

En aquest cas podem veure que durant un cert període de temps, la potència generada pel convertidor P1 s'ha multiplicat per 0 i com a conseqüència, la potència generada per l'altre convertidor (P2) augmenta una mica. Evidentment la potència que augmenta P2 és menor a la que deixa de produir P1, ja que la correcció es fa entre quatre convertidors. La potència extra generada pels quatre compensa la que deixa de generar P1.

7.3.3- Pèrdua sobtada d'un convertidor

En aquest cas es simula com reaccionaria la planta en el cas que un dels convertidors deixés de funcionar de cop com podria passar en cas d'una avaria. És una situació semblant a l'anterior, però no és tant progressiva. El resultat però, ha de ser el mateix: els convertidors que segueixen en funcionament han de detectar l'error i generar més potència per evitar que la planta s'hagi de desconnectar. La Figura 7.24 mostra les corrents del convertidor, avariats quan es porten 1,2 segons de simulació.

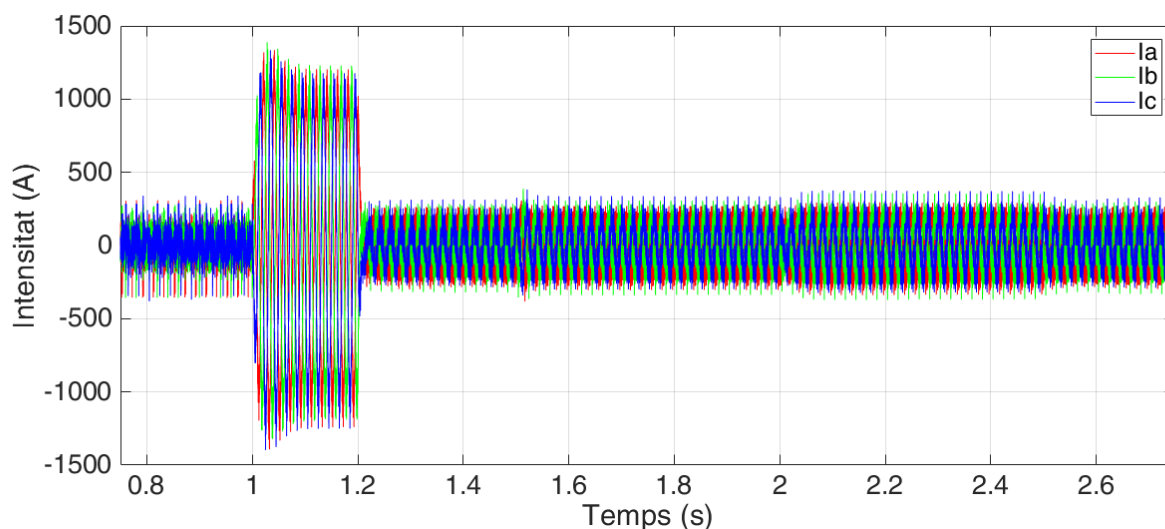


Figura 7.24. Corrents del convertidor que s'atura al cap d'1,2 segons d'haver començat la simulació

Podem comprovar com les corrents s'anul·len (tot i haver-hi una mica de soroll) en el moment en que el convertidor s'espalla.

La Figura 7.25 mostra la potència del parc sencer. Podem observar com en el segon 1,2 hi ha una disminució de la potència generada, però aquest error és corregit de seguida pels convertidors que segueixen en funcionament i la planta continua generant la potència que es demana.

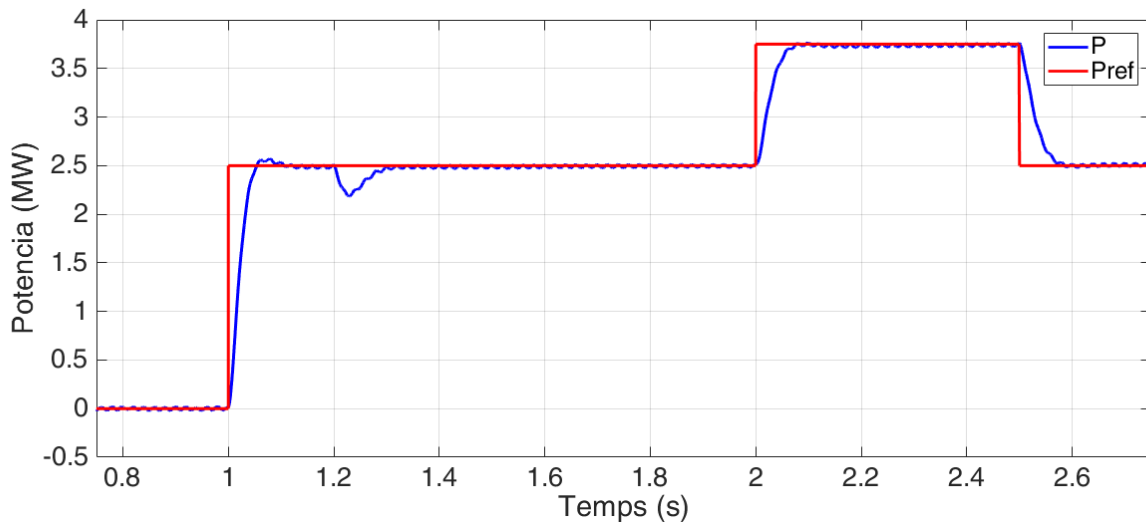


Figura 7.25. Potència generada per tota la planta durant la fallada d'un dels convertidors al segon 1,2

Per acabar, es fa una comparació de la potència generada pel convertidor avariament i la generada per un dels altres convertidors.

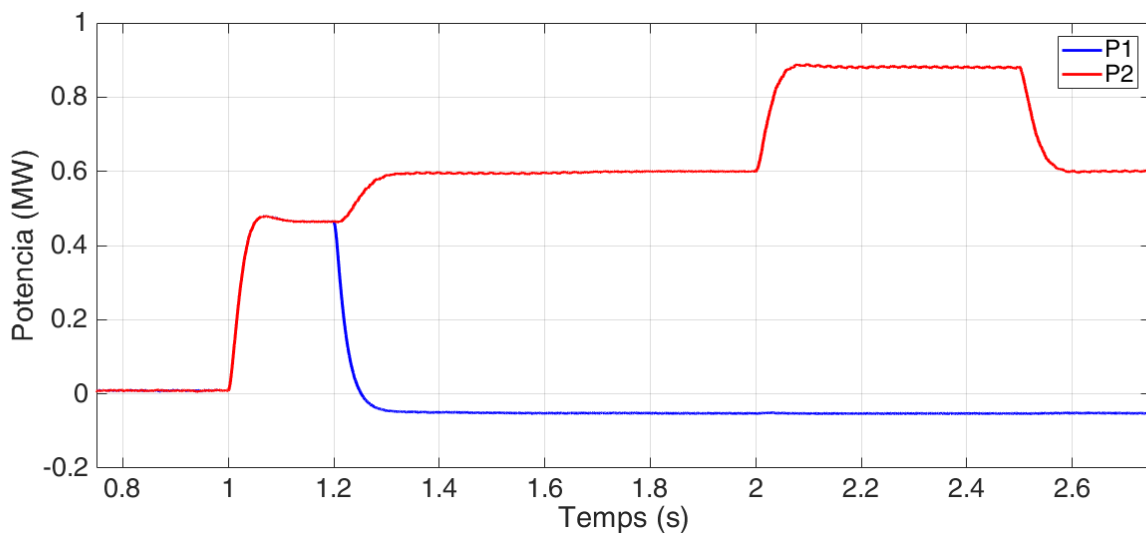


Figura 7.26. Comparació de la potència generada pel convertidor avariament i per un dels que segueix en funcionament

Podem observar com a partir del segon 1,2 la potència generada pel primer convertidor (P1) s'anul·la i la potència generada pel segon convertidor (P2) augmenta lleugerament per compensar la pèrdua de potència. Entre tots els convertidors que segueixen funcionant, compensen tota la potència que deixa de produir-se en P1.

7.3.4- Curtailment

En aquest apartat es vol simular com es comportaria la planta en el cas que el TSO imposés una potència inferior a la potència disponible de la planta. Per fer-ho, al segon 2,5 es demanarà que la planta treballi molt per sota la seva potència nominal durant un cert període de temps (període on representa que la planta podria produir més del que el TSO demana) i passat aquest temps, es tornarà a produir la potència anterior al *curtailment*. La Figura 7.27 mostra la potència generada per la planta i la referència durant la simulació.

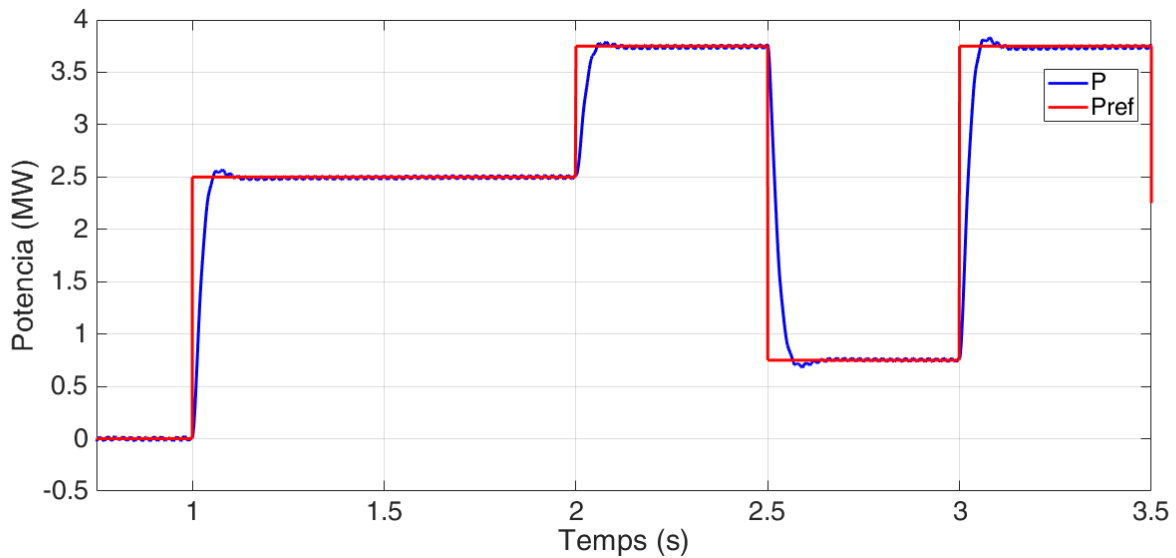


Figura 7.27. Potència generada per la planta durant un *curtailment*

8- Pressupost del projecte

En aquest apartat es resumeix el cost total de la realització d'aquest estudi. El pressupost es dividirà en dos parts. Primer de tot es presentarà el cost material dels equips que s'han fet servir i després es calcularà el cost de les hores que s'han dedicat a l'estudi i recerca. Finalment es calcularà el cost total del projecte.

8.1- Cost material

Es considerarà com a cost material tots els equips informàtics utilitzats per realitzar el treball. Durant el projecte s'han fet servir versions per estudiant de Matlab i PSCAD, que no tenen cap cost addicional. Pel temps d'amortització es considerarà que el projecte ha durat sis mesos. La taula 8.1 mostra el pressupost del projecte.

Concepte	Preu unitari [€]	Unitats	Cicle de vida [anys]	Amortització
Ordinador Portàtil	700	1	8	43,75
Ratolí	20	1	1	10
PSCAD	0	1		0
Matlab	0	1		0
Subtotal				53,75
IVA (21%)				11,29
Total				65,04

Taula 8.1. Pressupost material del projecte

8.2- Cost recursos humans

Es consideraran recursos humans totes les hores dedicades al projecte en concepte d'investigació, estudi del sistema a simular, aprenentatge del programari utilitzat i creació del model. També s'hi inclouen les hores dedicades a la simulació i redacció de la memòria. La taula 8.2 mostra el pressupost desglossat pels diferents conceptes.

Concepte	Preu [€/hora]	Temps dedicat [h]	Cost [€]
Investigació, estudi i aprenentatge	30	140	4200
Creació model i simulació	40	200	8000
Redacció memòria	20	50	1000
Subtotal			13200
IVA (21%)			2772
Total			15972

Taula 8.2. Pressupost pels recursos humans del projecte

8.3- Cost total del projecte

La següent taula mostra el pressupost total pel projecte, que és la suma dels dos costos detallats anteriorment.

Concepte	Cost [€]
Cost material	65,04
Cost recursos humans	15972
Subtotal	16037,04
IVA (21%)	3367,78
Total	19404,82

Taula 8.3. Pressupost total pel projecte

9- Impacte ambiental

Tot i ser una font d'energia renovable i per tant, amb un impacte ambiental molt menor al que podrien tenir les fonts d'energia a partir de combustibles fòssils, l'energia solar també repercuteix de diferents maneres al medi ambient.

9.1- Ús del terreny

Les plantes solars requereixen de grans superfícies, sobretot aquelles de més potència. Això pot provocar la degradació del terreny i la pèrdua d'hàbitats naturals. La superfície dedicada a l'energia solar no es pot fer servir amb altres objectius com la ramaderia o l'agricultura. Per reduir aquest impacte, s'han d'utilitzar terrenys que per les seves característiques, no es puguin destinar a aquestes pràctiques, com podrien ser terrenys amb baixa productivitat agrícola.

9.2- Emissions de gasos d'efecte hivernacle.

La producció d'energia solar no comporta generació de cap gas d'efecte hivernacle. Tot i això, etapes com el cicle de producció dels panells, transport, instal·lació i més endavant, desmantellament sí que poden tenir associades unes certes emissions. En tot cas, aquestes són molt inferiors a les que tindria una planta tèrmica que funcionés a partir de la combustió de combustibles fòssils, així que segueix sent una de les alternatives més netes.

9.3- Contaminació acústica

Durant el muntatge de la planta o el seu posterior desmantellament es poden arribar a certs nivells de contaminació acústica, però a diferència d'altres fonts renovables com l'eòlica, l'energia solar no produeix cap soroll durant el temps de funcionament. Per tant, l'impacte sobre la fauna o poblacions properes és nul.

9.4- Impacte visual

Com ja s'ha comentat, la superfície necessària per la planta pot comportar la pèrdua de terrenys o boscos, fet que comporta un deteriorament del paisatge. Tot i això, l'energia solar no requereix de grans estructures com d'altres fonts d'energia, per tant l'impacte visual és mínim. A més a més, el fet de no requerir d'aquestes estructures fa que no hi hagi impacte, per exemple, en el vol dels ocells o d'altres animals.

9.5- Materials

Els panells fotovoltaics estan compostats principalment de silici, un material que s'extreu de la sorra, molt abundant i per tant amb poc impacte ambiental. No obstant, durant el procés de fabricació del panell es fan servir substàncies tòxiques o perilloses, com per exemple l'àcid clorhídric, àcid sulfúric, àcid nítric, fluorur d'hidrogen, 1-1-1-tricloroetà i acetona [6]. Les quantitats de substància necessàries varien en funció de la tecnologia emprada, però en qualsevol cas cal assegurar-se que un cop acabada la vida útil dels panells, aquests es tractaran com és degut, ja que sinó podrien representar un perill pel medi ambient.

Conclusions

En aquest treball s'ha dissenyat un model de simulació d'una planta solar fotovoltaica de gran escala. S'han estudiat per separat elements que la formen com per exemple els convertidors i se n'ha fet un model. Alhora s'ha estudiat com controlar aquests elements individualment i s'ha dissenyat un sistema de control. S'ha comprovat que aquest era estable i satisfesia les nostres necessitats. Posteriorment s'han ajuntat els models de diferents elements per representar la planta sencera i s'ha simulat.

S'ha pogut comprovar que els models de control eren estables, que complien les diferents consignes que se'ls demanava i que funcionaven correctament

En un futur hi hauria encara diferents opcions per millorar el model. En primer lloc, es podrien millorar els controladors per tal d'obtenir respostes més ràpides o més precises. En segon lloc, es podrien afegir més elements al model, com podrien ser més convertidors, panells o transformadors. També seria interessant afegir elements per la compensació de reactiva, com podrien ser els STATCOMS.

Agraïments

En primer lloc, vull donar les gràcies al director del treball, l'Eduardo Prieto, per haver-se preocupat d'aconsellar-me i ajudar-me amb paciència, i haver-me ensenyat el camí a seguir en tot moment. Vull donar les gràcies també a l'Oriol Gomis per haver-me donat l'oportunitat de fer aquest treball i per haver resolt els meus dubtes quan ho he necessitat. Sense el seu ajut, aquest treball no hagués estat possible.

Vull agrair a tots els companys i companyes del CITCEA per haver-me fet costat, en especial a tots aquells que desinteressadament, m'han resolt els dubtes i m'han donat suport en tot el que han pogut.

Finalment, vull agrair a la meva família, als meus amics i en especial a la meva parella, per haver-me animat a seguir endavant en els moments difícils, quan no tot sortia com estava previst. Per haver dedicat el seu temps a fer-me costat però també per haver compartit els bons moments junts. A tots ells, moltes gràcies!

Annex A: Transformades de Park i Clarke

Com hem pogut comprovar, els valors de les tensions i les intensitats de la xarxa o el convertidor pel costat d'alterna són de naturalesa oscil·lant. Aquest fet dificulta molt el control i fa que sigui bastant complicat treballar amb elles. Amb l'objectiu de simplificar les equacions i el control del convertidor, s'utilitzen transformades matemàtiques com les de Park i Clarke.

A.1- Transformada de Clarke

La transformada de Clarke passa un vector de tres magnituds oscil·lants (com els que representen moltes de les variables elèctriques) a un vector on dues de les magnituds oscil·len mentre que la tercera és nul·la. Matemàticament es pot definir a partir de les següents equacions:

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \\ x_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}$$

I l'aplicació inversa queda definida com:

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \\ x_0 \end{bmatrix}$$

Geomètricament es pot definir la transformada de Clarke com una projecció dels tres valors (a, b, c) sobre dos eixos estacionaris (α , β). La figura A.1 mostra la representació geomètrica de l'aplicació.

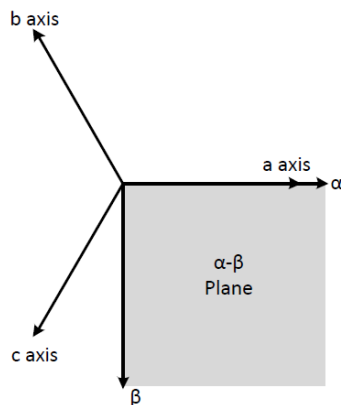


Figura A.1. Representació geomètrica de la transformada de Clarke [3]

A.2- Transformada de Park

Com ja s'ha comentat, la transformada de Clarke projecta els eixos abc sobre dos eixos estacionaris $\alpha\beta$. Si fem aquesta projecció sobre dos eixos no estacionaris (és a dir, que girin a la freqüència adequada) aconseguirem que el resultat sigui constant i no oscil·li. Així doncs, podem entendre la transformada de Park com una transformada de Clarke a la qual li apliquem una rotació als eixos de destí (eixos q i d). Amb la transformada de Park aconseguirem l'objectiu de passar un vector de tres components oscil·lants a un altre de components constants. Les equacions que descriuen aquesta transformació són les següents:

$$\begin{bmatrix} x_q \\ x_d \\ x_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin(\theta) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}$$

On la seva inversa es pot expressar amb les equacions:

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_q \\ x_d \\ x_0 \end{bmatrix}$$

La representació geomètrica de la transformada de Park està il·lustrada a la figura A.2.

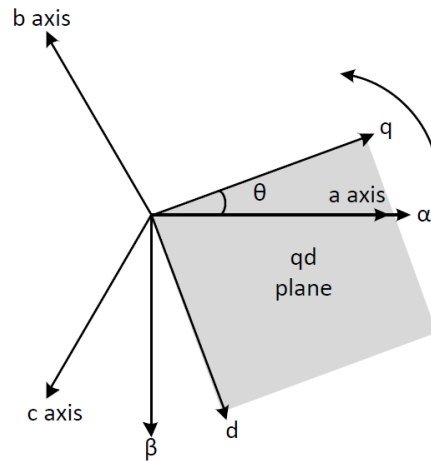


Figura A.2. Representació geomètrica de la transformada de Park [3]

El resultat d'aplicar les transformades de Clarke i Park es poden veure a les figures A.3, A.4 i A.5.

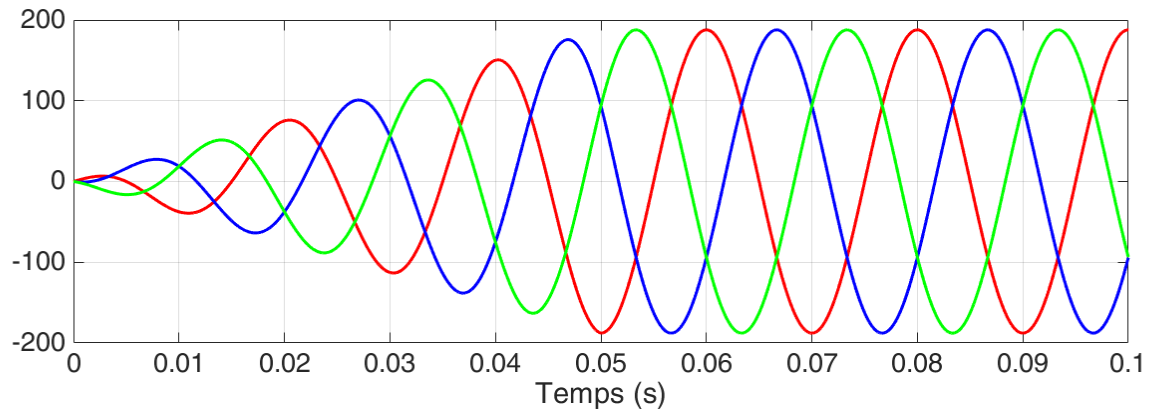


Figura A.3. Senyals sinusoidals, en referència abc

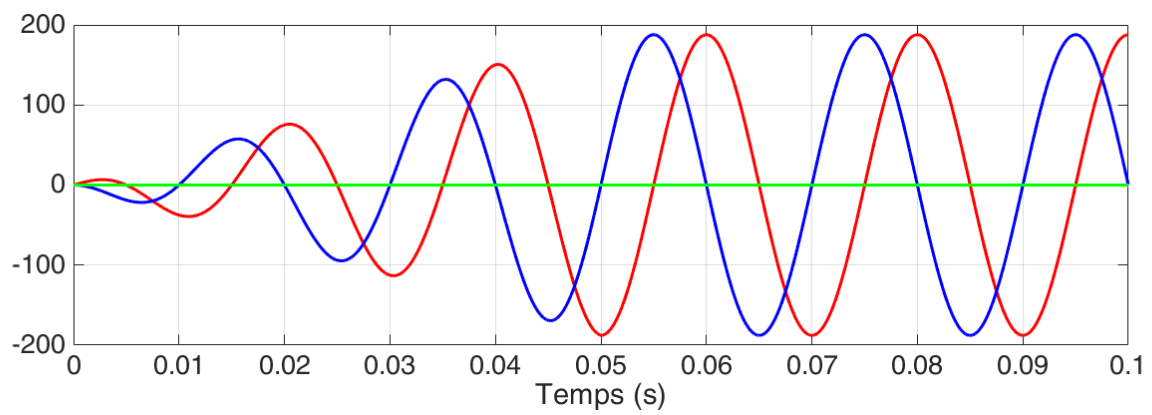


Figura A.4. Senyal en referència $\alpha\beta 0$, després d'aplicar la transformada de Clarke

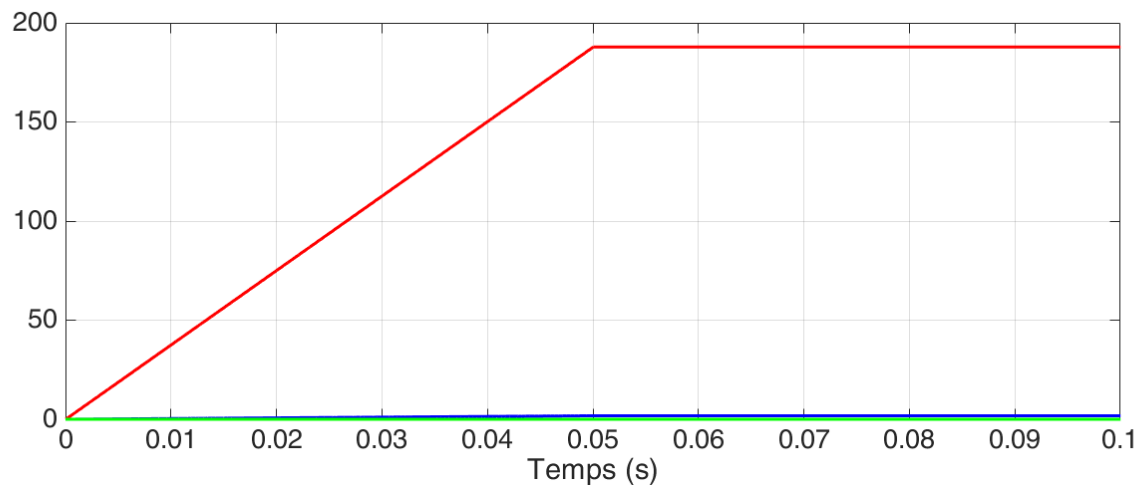


Figura A.5. Senyal en referència $qd0$, després d'aplicar la transformada de Park

Com podem veure, en aplicar la transformada de Park fent servir un angle adequat, aconseguim que els valors de les variables esdevinguin constants.

Annex B: Paràmetres del convertidor

En aquest annex s'indiquen els paràmetres fets servir per la simulació del convertidor del parc fotovoltaic. Han estat calculats amb les equacions descrites al llarg del treball i en alguns casos, s'han retocat alguns paràmetres amb l'objectiu d'aconseguir que el sistema fos més estable o presentés respostes més ràpides o lentes.

PARÀMETRES CONVERTIDOR			
R	0,02 Ω	L	0,00024 H
PLL			
Kp	62,83	τ	0,0005 s
Current Loop			
Kp	0,8	Ki	12,5
Voltage Loop			
Kp	0,1	Ki	0,3

Bibliografia

- [1] Ana Cabrera Tobar, «Topologies for large scale photovoltaic power plants,» Barcelona, 2016.
- [2] «International Renewable Energy Agency (IRENA),» [En línia]. Available: <http://www.irena.org/solar>. [Último acceso: 09 06 2018].
- [3] Adrià Junyent Ferré, Oriol Gomis Bellmunt, Agustí EgeaAlvarez, «Active and reactive power control of grid connected distributed generation systems,» Barcelona, 2011.
- [4] Manitoba HVDC Research Centre, «2-Quadrant AC-DC Conversion using VSC: The Active Rectifier Scheme,» 2016.
- [5] Mònica Aragüés Peñalba, Ricard Ferrer San Jose, Oriol Gomis Bellmunt, Luis Serrano Salamanca, Carlos Pacheco Navas, Eduard Bullich Massagué, «Power Plant Control Experience in Large Scale PV Plant. Modelling, Control, Simulation and Implementation,» Barcelona.
- [6] «Energías Renovables,» [En línia]. Available: <http://www.energiasrenovablesinfo.com/solar/impacto-medioambiental-energia-solar/>. [Último acceso: 16 06 2018].
- [7] Ricard Ferrer San Jose, Mònica Aragüés Peñalba, Luís Serrano Salamanca, Carlos Pacheco Navas, Oriol Gomis Bellmunt, Eduard Bullich Massagué, «Power plant control in large-scale photovoltaic plants: design, implementation and validation in a 9.4 MW photovoltaic plant,» Barcelona, 2015.
- [8] Eduardo Prieto Araujo, «Anàlisi dinàmica de xarxes multiterminal HVDC-VSC per al transport d'energia elèctrica en corrent continu en parcs eòlics marins,» Barcelona, 2011.
- [9] Marian Stefan Nicolae, Petre Marian Nicolae, Marius Popescu, Dinut-Lucian Popa, «Design and Simulation of a 10 MW Photovoltaic Power Plant using MATLAB and Simulink,» 2016.
- [10] Pablo Ledesma, «Regulación de frecuencia y potencia,» Universidad Carlos III, Madrid, 2008.
- [11] Camilo José Carrillo González, «Introducción al PSCAD,» Universidad de Vigo, Vigo, 2004.